



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH**

---

**Escola Superior d'Enginyeries Industrial,  
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa**

**Titulació:**

Máster en Ingeniería de Sistemas Automáticos y Electrónica Industrial

**Alumno:**

Jimmy Arturo Martínez Reyes

**Título de Trabajo de Fin de Máster:**

Estudio y Simulación de una Antena Multibanda para Textiles Inteligentes.

**Director:**

Ignacio Gil Gali

**Convocatoria de entrega:**

Octubre 2018

**Contenido de este volumen:**

Memoria

## Contenido

<b>Índice de figuras</b> .....	3
<b>Índice de tablas</b> .....	5
<b>Índice de fórmulas</b> .....	6
<b>Introducción</b> .....	7
<b>Justificación</b> .....	8
<b>Objetivo y alcance</b> .....	8
<b>1. Estado del arte</b> .....	9
1.1 Wearable Electronics. ....	10
1.2 Textiles inteligentes. ....	10
1.3 Antena para textiles inteligentes .....	15
<b>2. Antenas: Definición, clasificación y parámetros de diseño.</b> .....	17
2.1 Definición de antena. ....	17
2.2 Clasificación de antenas. ....	17
2.3 Parámetros de diseño .....	22
<b>3. CTS Studio Suite 2018</b> .....	26
3.1 ¿Qué es el CST Studio Suite 2018? .....	26
3.2 Herramientas utilizadas para el diseño. ....	27
3.3 Cálculo SAR .....	31
<b>4. Modelado y simulación de la antena multibanda.</b> .....	34
4.1 Diseño de la antena. ....	34
4.2 Relación de absorción específico (SAR) .....	54
<b>5. Conclusiones y trabajo a futuro</b> .....	64
5.1 Conclusiones .....	64
5.2 Trabajo a futuro .....	64
<b>Bibliografía</b> .....	65

## Índice de figuras

Figura 1.1 Accesorios para vestir inteligentes [4] .....	9
Figura 1.2 Accesorios inteligentes [5] .....	10
Figura 1.3 Prendas con funciones inteligentes. [5] .....	11
Figura 1.4 Textróica.....	12
Figura 1.5 Electrónica impresa: Circuito electrónico impreso flexible .....	12
Figura 1.6 Tejido fotovoltaico .....	13
Figura 1.7 Pieza impresa en 3D. ....	13
Figura 1.8 Traje FELIN .....	14
Figura 1.9 Antena con grafeno y PDMS doblada a 25 mm de radio en dirección 'x' y 'y' [9].....	15
Figura 1.10 Pérdida de retorno de la antena cuando esta plana y cuando se dobla en 'x' y 'y' [9] .....	15
Figura 1.11 Pérdida de retorno de la antena en espacio libre y sobre el cuerpo. [9] .....	16
Figura 2.1 Torre Collserola, Barcelona, Cataluña. ....	17
Figura 2.2 Antena de alambre: Dipolo .....	18
Figura 2.3 Antena de alambre: Hélice. ....	18
Figura 2.4 Antena de alambre: Loop .....	19
Figura 2.5 Antenas de apertura.....	19
Figura 2.6 Microstrip Patch Antena [6] .....	20
Figura 2.7 Partes de una antena reflectora [3]. ....	21
Figura 2.8 Partes de una antena de lente. ....	21
Figura 2.9 Comparación entre una antena de reflexión y una antena de lente. ....	21
Figura 2.10 Directividad de una antena. ....	23
Figura 2.11 Diagrama de radiación de una antena. [10] .....	24
Figura 3.1 Ejemplo de simulación SAR de un teléfono móvil [11] .....	26
Figura 3.2 Herramienta "Brick. ....	27
Figura 3.3 Herramienta "Blend" .....	28
Figura 3.4 Herramienta "Discrete port" .....	29
Figura 3.5 Herramienta "Field Monitor" .....	30
Figura 3.6 Herramienta "Setup Solver". ....	30
Figura 3.7 Relación de absorción específica (SAR) [11] .....	31
Figura 3.8 Ejemplo del SAR para radiaciones de un móvil. ....	32
Figura 3.9 Herramienta "SAR Calculation" .....	33
Figura 4.1 Partes de una antena microstrip patch .....	35
Figura 4.2 Parámetros del material1: Tangente delta de pérdida .....	35
Figura 4.3 Parámetros del material1. Epsilon.....	36
Figura 4.4 Microstrip Patch Antenna Solver [13] .....	36
Figura 4.5 Diseño final de la antena .....	38
Figura 4.6 Dimensiones del diseño de la antena final : Vista Superior .....	38
Figura 4.7 Dimensiones del diseño de la antena final : Vista frontal .....	39
Figura 4.8 Diseño de la antena con una sola ranura en el medio.....	39
Figura 4.9 Parámetro S11 de la antena con una sola ranura. ....	40
Figura 4.10 Parámetro S11 de la antena modelo a 5GHz.....	41
Figura 4.11 Parámetro S11 de la antena a 2,4 GHz.....	41
Figura 4.12 Diagrama de radiación de la antena a 2,4 GHz: 3D .....	42
Figura 4.13 Diagrama de radiación de la antena a 2,4 GHz: Polar .....	43
Figura 4.14 Diagrama de radiación de la antena a 5,0 GHz: 3D .....	44
Figura 4.15 Diagrama de radiación de la antena a 5GHz: Polar .....	44

Figura 4.16 Resultados de directividad a 2,4 GHz y 5GHz de la antena. ....	45
Figura 4.17 Resultados de ganancia a 2,4 GHz y 5GHz de la antena. ....	45
Figura 4.18 Antena curvada.....	46
Figura 4.19 Parámetro S11 de la antena curva a 100 mm .....	46
Figura 4.20 Diagrama de radiación polar de la antena curvada a 100mm a 2,4 GHz .	47
Figura 4.21 Diagrama de radiación polar de la antena curvada a 100mm a 5,0 GHz	47
Figura 4.22 Resultados de directividad para 2,4 GHz y 5 Ghz de la antena curvada a 100 mm. ....	48
Figura 4.23 Resultados de ganancia para 2,4 GHz y 5 Ghz de la antena curvada a 100 mm. ....	48
Figura 4.24 Parámetro S11 de la antena curvada a 85 mm .....	49
Figura 4.25 Diagrama de radiación de la antena curvada a 2,4 GHz a 85 mm. ....	49
Figura 4.26 Diagrama de radiación de la antena curvada a 5 GHz a 85 mm .....	50
Figura 4.27 Resultados de directividad a 2,4 Ghz y 5 Ghz curvada 85 mm .....	50
Figura 4.28 Resultados de ganancia a 2,4 Ghz y 5 Ghz curvada 85 mm .....	50
Figura 4.29 Parámetro S11 de la antena curvada a 75 mm .....	51
Figura 4.30 Diagrama de radiación polar a 2,4 Ghz de la antena curvada a 75 mm .....	51
Figura 4.31 Diagrama de radiación polar a 5,0 Ghz de la antena curvada a 75 mm .....	52
Figura 4.32 Resultados de directividad para 2,4 Ghzz y 5,0 Ghz de la antena curvada a 75 mm .....	52
Figura 4.33 Resultados de ganancia para 2,4 Ghzz y 5,0 Ghz de la antena curvada a 75 mm .....	52
Figura 4.34 Características físicas del modelo humano. ....	55
Figura 4.35 Antena colocada en el pecho .....	56
Figura 4.36 Simulación SAR 10g a 2,4 GHz: Pecho.....	56
Figura 4.37 Parámetro S11 de la antena 2,4Ghz en el pecho .....	57
Figura 4.38 Antena montada en el brazo derecho. ....	57
Figura 4.39 Simulación SAR 10g a 2,4 GHz: Brazo.....	58
Figura 4.40 Parámetro S11 de la antena a 2,4 GHz en el brazo .....	58
Figura 4.41 Antena montada en la espalda.....	59
Figura 4.42 Simulación SAR 10g a 2,4 GHz: Espalda.....	59
Figura 4.43 Parámetro S11 de la antena trabajando a 2,4 GHz en la espalda. ....	60
Figura 4.44 Simulación SAR 10g a 5Ghz: Pecho.....	60
Figura 4.45 Parámetro S11 de la antena operando a 5 GHz en el pecho.....	61
Figura 4.46 Simulación SAR 10g a 5 GHz: Brazo.....	61
Figura 4.47 Parámetro S11 de la antena operando a 5 GHz en el brazo .....	62
Figura 4.48 Simulación SAR 10g a 5GHz en la espalda.....	62
Figura 4.49 Parámetro S11 de la antena operando a 5GHz en la espalda. ....	63

## Índice de tablas

Tabla 4-1 Parámetros del diagrama de radiación de la antena a 2,4 GHz .....	42
Tabla 4-2 Parámetros del diagrama de radiación de la antena a 5 GHz. ....	43
Tabla 4-3 Resultados finales de los parámetros de la antena plana. ....	53
Tabla 4-4 Resultados finales de los parámetros de la antena doblada a 100 mm. ....	53
Tabla 4-5 Resultados finales de los parámetros de la antena dobla a 85 mm. ....	53
Tabla 4-6 Resultados finales de los parámetros de la antena doblada a 75 mm.....	53
Tabla 4-7 Diferencias de eficiencias al compararlas con la antena plana. ....	54
Tabla 4-8 Resultados de simulación SAR a 10g .....	63

## Índice de fórmulas

<i>Fórmula 2-1</i> .....	22
<i>Fórmula <a href="#">2-2</a></i> .....	22
<i>Fórmula 2-3</i> .....	22
<i>Fórmula 2-4</i> .....	22
<i>Fórmula 2-5</i> .....	23
<i>Fórmula <a href="#">3-1</a></i> .....	31
<i>Fórmula 3-2</i> .....	31
<i>Fórmula 4-1</i> .....	37
<i>Fórmula 4-2</i> .....	37
<i>Fórmula 4-3</i> .....	37

## Introducción

En los últimos años, el interés en los textiles inteligentes ha crecido muchísimo. Es interesante el hecho de poder integrar la electrónica de manera discreta en cualquier tipo de vestimenta. Sin embargo, está claro que esto representa un verdadero reto de diseño para la ingeniería.

Lo que se busca con este trabajo es diseñar y modelar una antena que opere a dos frecuencias (Wi-Fi y Bluetooth) cuyo sustrato este hecho de material textil para que pueda ser perfectamente integrada en la ropa.

La eficiencia de la antena es clave en este trabajo. El verdadero reto del proyecto es conseguir que la antena tenga un buen desempeño y que además pueda trabajar a niveles de radiación bajos para el cuerpo humano, ya que no tendría ningún sentido fabricar una antena que perjudique la salud del que la porte. Por este motivo se han realizado simulaciones para 2.4 GHz Y 5 GHz para cada parte del cuerpo en la que se colocó la antena, estas partes son: Pecho, espalda y brazo derecho. El software utilizado para simular y diseñar la antena es el CTS Studio 2018.

Este proyecto se ha llevado a cabo como trabajo final de máster en la Universidad Politécnica de Cataluña en el semestre de primavera del 2018 en el campus del ESEIAAT con el departamento de EET.

El primer paso fue comenzar a familiarizarse con el software CTS Studio 2018 cuya herramienta ha sido esencial a lo largo de todo el proceso. A partir de esto, se han realizado cientos de simulaciones de antenas hasta obtener la de mejor rendimiento operando a 2.4 GHz y 5 GHz, Wi-Fi y Bluetooth respectivamente [1]. Después, se realizaron las simulaciones de la radiación de la antena sobre el cuerpo humano con la ayuda del Model SAR a ambas frecuencias, herramienta que encuentra en la librería del CTS Studio 2018.

El presente trabajo se estructura en 5 capítulos. En el primero se introduce en el tema de la electrónica usable y textiles inteligentes. Se exponen posibles aplicaciones posibles aplicaciones que puedan existir a corto plazo y el impacto que pueda llegar a tener en la vida cotidiana. También se presenta una investigación que trata acerca del diseño en la de antenas incorporadas en textiles.

El segundo capítulo aborda la teoría de antenas donde se detallan algunos de los parámetros que deben de tomar en cuenta para diseñar una antena, los tipos de antenas que existen y la razón por la cual se ha optado por trabajar con la Microstrip Patch Antena en este proyecto.

El tercer capítulo trata del software utilizado para las simulaciones CTS Studio 2018 donde se describen las herramientas que posee este software para este tipo de estudios.

En el capítulo número cuatro se describe todo el proceso para diseñar y modelar la antena, desde las primeras simulaciones obtenidas por el Microstrip Patch Antenna Solver, parámetros de diseño como: S11, ganancia, directividad, comparación entre antena plana y antena curvada, hasta los resultados de las simulaciones SAR.

## Justificación

La tecnología va avanzando cada día y la necesidad de adaptarse a ella es indiscutible. Este trabajo tiene como fin, realizar el diseño de una antena que pueda funcionar para enviar o recibir información por medio de Bluetooth y Wi-Fi, para que de esta manera pueda ser de utilidad en la inmensa gama de aplicaciones que pueda llegar a tener la tecnología de textiles inteligentes.

## Objetivo y alcance

El objetivo de este trabajo es diseñar y modelar una antena multibanda que trabaje de manera eficiente en la frecuencia de Bluetooth y Wi-Fi bajo la normativa europea SAR.

El alcance de este proyecto es obtener una antena eficiente, que pueda ser integrada en textiles inteligentes y que opere a las frecuencias de Bluetooth y Wi-Fi, 2,4 GHz y 5 GHz respectivamente. Cumpliendo el estándar europeo *IEEE* de los niveles SAR [2] máximos permitidos por la exposición del cuerpo humano a los campos electromagnéticos de radiofrecuencia.

Este trabajo puede servir como guía para al diseño de una antena ya sea mono o multibanda con sustrato textil para futuras aplicaciones en la tecnología de textiles inteligentes.

Para cumplir con el objetivo es necesario primer aprender a dominar la herramienta que se ha utilizado a lo largo de todo el proyecto que es el CST Studio Suite 2018 como también descubrir que ventajas y utilidades puede brindar este software para futuras investigaciones con respecto al diseño y modelado de antenas.



## 1. Estado del arte

El mercado de la tecnología de la ‘Wearable Electronics’ o Electrónica Usable está creciendo cada vez más, como por ejemplo Fitness Trackers, Health monitoring o, Smart Watches que según la Corporación Internacional de datos (IDC) es de lo más popular actualmente. [3]

La ‘Wearable Electronics’ o ‘Wearable Technology’ hace referencia a todos los dispositivos electrónicos inteligentes que han sido usados en el cuerpo ya sea como implante o como accesorios.

Como se muestra en la *figura 1.1*, existen prendas o accesorios inteligentes pueden ser utilizados en el cuerpo y tener al mismo tiempo la habilidad de conectarse a internet y habilitar información para poder así cambiarla entre una red y el dispositivo.



*Figura 1.1 Accesorios para vestir inteligentes [4]*

Actualmente ver el impacto que pueda a llegar a tener esta tecnología quizá sea difícil, como por ejemplo el hecho de que un traje de hospital tenga integrado un circuito cuyo propósito sea estar enviando o recibiendo información acerca de la salud de un paciente en tiempo real para monitorear su estado sin la necesidad de estar conectado a aparatos como sucede en muchos hospitales.

En este capítulo se presenta información respecto a ‘Wearable Electronics’ para posteriormente introducir el tema de textiles Inteligentes y antenas integradas en ellas.

### 1.1 Wearable Electronics.

La ‘Wearable Electronics’ o Electrónica usable hace referencia a todos los dispositivos electrónicos que se pueden conectar a Internet y ser usados en el cuerpo como accesorios. Estos dispositivos pueden fácilmente intercambiar datos a través de Internet con el usuario y otros dispositivos conectados.

Estos dispositivos ofrecen beneficios como la toma de decisiones optimizada, facilidad de manejo de emergencias, reducción de costos, calidad de vida mejorada, acceso a control remoto, estilo de vida saludable, gestión del tiempo, beneficio comercial y mejor seguridad. [5]

La electrónica vestible incluye los relojes, anillos, lentes, y ropa. (Figura 1.2)



Figura 1.2 Accesorios inteligentes [5]

Estos dispositivos han pasado a formar parte de la vestimenta de una persona actualmente. Ahora bien, si ya existen relojes que puedan ser capaces de permitir enviar mensajes, monitorear el ritmo cardíaco, revisar la ubicación GPS a través de ellos, ¿Se puede hacer lo mismo con una camisa? El siguiente apartado trata de responder esta pregunta.

### 1.2 Textiles inteligentes.

A pesar de que el concepto de textiles inteligentes y ropa inteligente como tal no tiene de mucho de haberse sumado al mundo textil, se puede ver que la industria lleva mucho tiempo enfocada en mejorar las propiedades de los textiles. Como por ejemplo las nuevas fibras químicas que han sido inventadas últimamente al unir membranas con sustratos textiles.

Como menciona H.R Mattila en el libro ‘Intelligent Textiles and Clothing’ [6], existen algunas propuestas para mejorar las propiedades y funcionabilidad de los textiles. Como se mencionó en el apartado 1.1, wearable electronics, un enfoque basado en la electrónica, ha comenzado a darle nuevas características a la ropa uniendo dispositivos electrónicos a las prendas. Los primeros resultados, sin embargo, han terminado usualmente en ropa abultada y voluminosa, no muy amigables con el usuario y muy poco

prácticos. Prendas que han terminado llenas de cable a su alrededor, baterías en los bolsillos y dispositivos electrónicos saliéndose de la superficie. La ropa se había convertido en una plataforma de soporte electrónico y era muy difícil de vestir y sentir algún tipo de comodidad.

El objetivo actual del desarrollo de la ropa inteligente es integrar directamente la electrónica en sustratos textiles [6]. Sería fabuloso tener una pieza de ropa que no aparente nada la tecnología que lleva por dentro como: Circuitos, sensores, antenas, entre otros, y que el usuario no tenga ningún problema a la hora de lavarla.



*Figura 1.3 Prendas con funciones inteligentes. [5]*

En este apartado se responden preguntas como: ¿Que es un textil inteligente?, ¿Qué aplicaciones y qué impacto podría llegar a tener en la vida cotidiana en un futuro cercano?

### *1.2.1 ¿Qué es un textil inteligente?*

Los Smart Textiles o Textiles Inteligentes tienen la habilidad de detectar y reaccionar ante parámetros fisiológicos, condiciones medioambientales, estímulos mecánicos, térmicos, químicos, fuentes eléctricas o magnéticas, con el objetivo de aportar un gran beneficio extra al que lo viste, integrando elementos informáticos y de comunicaciones. [7]

Existen algunas ramas intermedias entre la electrónica, la informática y la textilería, las cuales han permitido que este tema de textiles inteligentes vaya creciendo cada vez más.

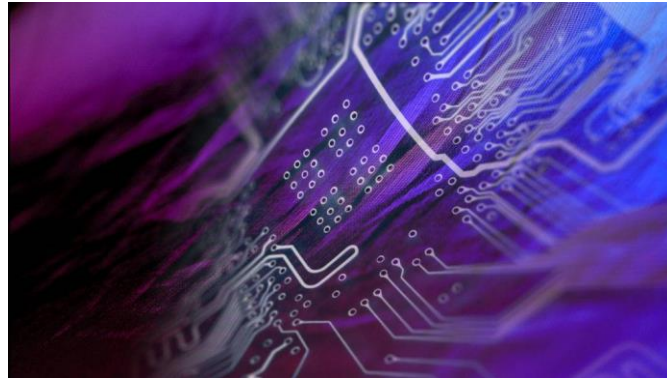
Algunas de estas ramas son las siguientes:

**Textrónica:** Es una materia interdisciplinar en el proceso de producción y diseño de materiales textiles [8], combinando la electrónica y la textilería integrando dispositivos electrónicos en sustratos textiles.

En esta interesante rama se trabajan proyectos de investigación y de desarrollo con el fin de buscar aplicaciones para el día a día. Algunos de estos proyectos son:

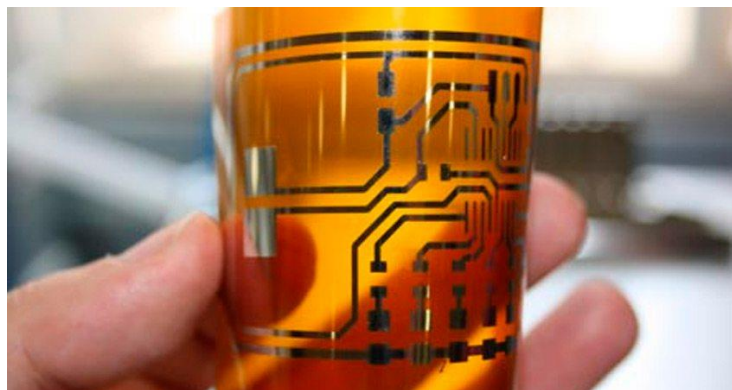
- ✓ Monitorización de variables fisiológicas para el control del estado de la salud de personas.

- ✓ Sistema de climatización textil capaz de dotar de confortabilidad térmica al usuario frente a altas y bajas temperaturas.
- ✓ Tejidos sensorizados capaces de proporcionar protección al usuario en entornos productivos peligrosos.
- ✓ Tejidos lumínicos con tecnología led integrada.
- ✓ Sistemas textiles de captación de energía por impacto o por movimiento.



*Figura 1.4 Textrónica*

**Electrónica impresa:** Se refiere a todos los componentes electrónicos que han sido fabricados mediante los procesos de impresión como: Huecograbado, serigrafía, flexografía, etc. Como por ejemplo: Estructuras textiles fotovoltaicas, textiles calefactables, circuitos electrónicos impresos flexibles, etc. [8]



*Figura 1.5 Electrónica impresa: Circuito electrónico impreso flexible*

**Funcionalización de hilos y tejidos:** A medida que avanza la tecnología, la modificación de materiales brinda la opción de agregar otras propiedades a los textiles con nuevas utilidades. Ejemplo de esto es: Hilos foto y termo activos, luminiscentes, tejidos fotovoltaicos, etc. [8]



*Figura 1.6 Tejido fotovoltaico*

**Impresión 3D:** De acuerdo con la reconocida marca especialista en la creación de softwares para el diseño 2D y 3D para ingeniería, arquitectura, construcción, etc., Autodesk, la impresión 3D es una familia de procesos con el propósito de producir objetos añadiendo material en capas correspondiente a secciones transversales sucesivas de un modelo 3D. [8]



*Figura 1.7 Pieza impresa en 3D.*

### *1.2.2 Aplicaciones*

Cuando comenzaron a aparecer los primeros teléfonos móviles, ni siquiera se tenía la más mínima idea que iban a evolucionar en lo que se conoce hoy en día como Smartphone. Nadie creyó que un móvil iba a llegar a ser tan indispensable como lo es en estos tiempos. A lo mejor parecía una locura pensar que un teléfono móvil iba a conectar a internet al igual que los ordenadores. Sin embargo, los niños de hoy crecen viendo esto como algo normal.

De igual manera, esta tecnología tiene un gran potencial para revolucionar el mundo textil como lo conocemos actualmente. Personalmente, creo que las investigaciones que se están llevando a cabo son los primeros pasos de esta tecnología.

En la ciencia ficción, se han visto trajes de súper héroes que a lo mejor si se piensa con cuidado hay una gran cantidad de cosas que tiene que ver con este tema. Un ejemplo de esto es la película nueva de Spider-Man: Homecoming (2017). El nuevo traje de este super héroe se ajusta a la medida del usuario, tiene localización GPS, puede llamar por



teléfono sin necesidad de tener un teléfono móvil como tal y hasta posee un servidor que le va enseñando a usar el traje (Como si fuera un SIRI en un iPhone)

Ahora bien, ¿Qué tan lejos de esta el ser humano de esto? A lo mejor, no tanto como el que se cree.

A continuación, se muestran aplicaciones que brinda este tipo de tecnología actualmente:



*Figura 1.8 Traje FELIN*

- **Equipos de protección personal:** Hace unos años la UE, financio un proyecto de textiles inteligentes para crear un prototipo de traje que tuviera sensores para medir la temperatura de la piel, flujo de calor y ritmo cardiaco y que tuviera una especie de mecanismo de enfriamiento integrado. Todo esto para chequear el estado térmico del trabajador. [8]
- **Equipo para militares y aplicaciones de defensa:** Traje de combate para soldados diseñado por Safran Electronics & Defense (*Figura 1.8*). Posee tecnología de batería recargable integrada, y posibilidad de fijar y ejecutar variedad de dispositivos electrónicos, incluso radios y armas. [8]
- **Industria espacial:** La agencia europea espacial (ESA) ha invertido para desarrollar un calcetín inteligente que posee sensores cuyo propósito es registrar la actividad eléctrica del músculo con el objetivo de reducir la degeneración del musculo por la ausencia de gravedad en el espacio. [8]
- **Medicina y salud:** Se ha desarrollado una camisa médica en Finlandia la cual posee sensores médicos sensibles integrados por medio de una cinta conductora textil. Con esto se capturan datos y se envían inalámbricamente a un dispositivo extraíble electrónico pegado en la camiseta. [8]

### 1.3 Antena para textiles inteligentes

Como se ha visto en el apartado 1.2, esta tecnología de los textiles inteligente permite tomar y enviar datos como por ejemplo: Ubicación GPS, monitoreo cardiaco, temperatura, entre otros. Es indispensable que la electrónica integrada en textil lleve consigo una antena para el intercambio de información inalámbricamente.

Las antenas se consideran un componente básico para esta nueva tendencia. Aquellas que puedan integrarse en la ropa sin interferir en las actividades o movimientos de la persona. (Figura 1.9). Por tanto, estas antenas combinan la robustez, la flexibilidad y a la comodidad de la ropa.

Diseñar y modelar esta antena sería de gran utilidad para ayudar de cierta manera a complementar las investigaciones que se realizan actualmente.

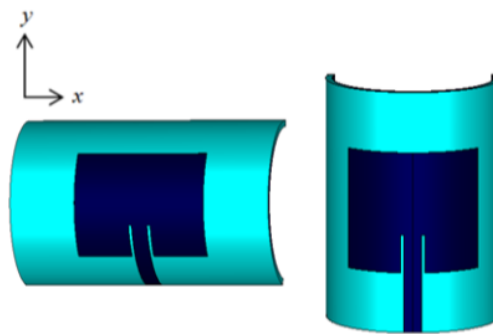


Figura 1.9 Antena con grafeno y PDMS doblada a 25 mm de radio en dirección 'x' y 'y' [9]

En el año 2014, M.M. Mansor, S.K.A. Rahim y U.Hashim investigadores de la Universiti Teknologi de Malaysia y Universiti Malaysia Perlis, realizaron un estudio muy parecido al que se realizó en este trabajo. Su publicación “A 2.45 GHz Wearable Antenna using Conductive Graphene and Polymer Substrate” [9] trata de la integración de grafeno en una capa sustrato flexible a banda de 2.45 GHz. Diseñaron una antena Microstrip Patch Antenna donde el parche y el tierra es de grafeno los cuales fueron a integrados a un polímero flexible llamado Polydimethylsiloxane (PDMS) y lo modelaron con el software CST Microwave Studio (Figura 1.9). Según sus anotaciones, doblar la antena alrededor del eje X o alrededor del eje Y, lo cual tiene sentido ya que los materiales son flexibles, provoca pequeños cambios en la ganancia debido al aumento en la pérdida de retorno. (Figura 1.10)

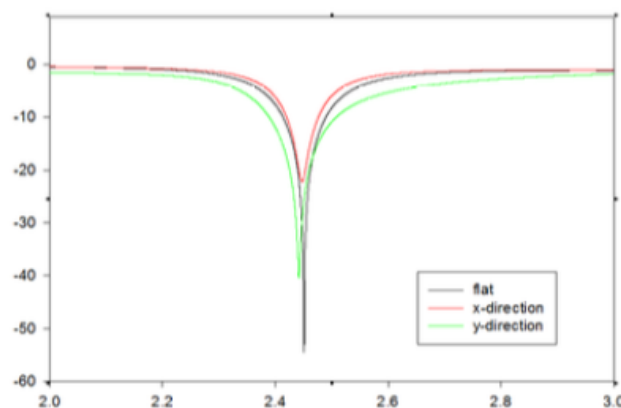


Figura 1.10 Pérdida de retorno de la antena cuando esta plana y cuando se dobla en 'x' y 'y' [9]

De igual manera, con la ayuda de uno de los modelos humanos que posee la galería del CST, colocaron la antena sobre el brazo y se dieron cuenta que la pérdida de retorno aumenta mucho, distorsionando esta manera la ganancia de la antena. (Figura 1.11)

Esta publicación fue el punto de partida para este trabajo porque es muy ilustrativo y aporta material importante a modo de guiar a otras personas para futuras investigaciones del tema.

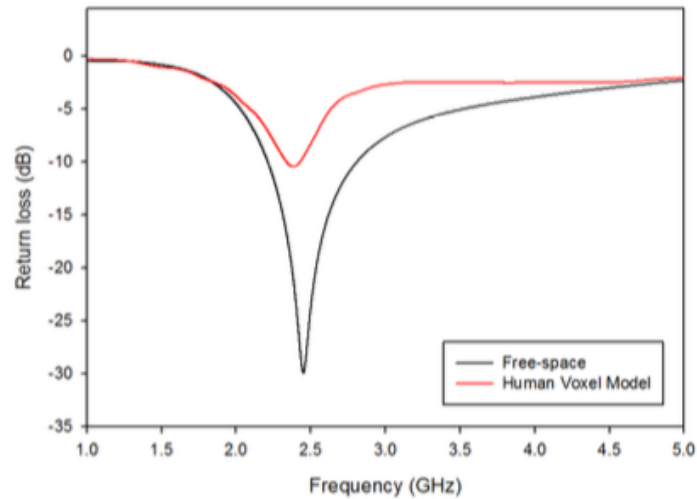


Figura 1.11 Pérdida de retorno de la antena en espacio libre y sobre el cuerpo. [9]



## 2. Antenas: Definición, clasificación y parámetros de diseño.

Las antenas son estructuras que emiten ondas electromagnéticas para poder transmitir un programa de radio, un programa de TV, conectar por medio de bluetooth un móvil a un altavoz para escuchar una canción, conectarse a internet por medio del Wi-Fi. Sin embargo, cada antena es diferente a otra, algunas trabajan a frecuencias mucho más bajas que otras.



Figura 2.1 Torre Collserola, Barcelona, Cataluña.

Este capítulo trata teoría de antenas básica, describiendo aspectos como: Su composición, tipos de antena y los parámetros que se deben de tomar en cuenta a la hora del diseño.

### 2.1 Definición de antena.

Acorde con la *IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)* [1] una antena es la parte de un sistema receptor o transmisor que ha sido diseñada con el propósito de radiar o recibir ondas electromagnéticas.

Una antena básicamente es un dieléctrico diseñado para radiar o recibir energía electromagnética eficientemente. En todo sistema de comunicación, las antenas son las encargadas de enlazar un punto con otro, por ejemplo: Recibir o transmitir señales de radio o TV.

### 2.2 Clasificación de antenas.

En la actualidad, existen muchos tipos de antenas las cuales varían en su forma geométrica, en su rango de operación, la forma del campo electromagnético que emiten, entre otros. En este trabajo se han tomado las más relevantes que son:

- Antena de alambre
- Antena de apertura
- Antena de parche de micro banda (Microstrip Patch Antenna)

- Antenas en fase
- Antenas reflectoras
- Antenas de lente

### 2.2.1 Antenas de alambre

Este tipo de antena es quizá estéticamente es el más sencillo de todos y al mismo tiempo el más utilizado hoy en día, prácticamente hay una antena de alambre en todas partes. Se pueden encontrar en: Edificios, aviones, automóviles, entre otros.

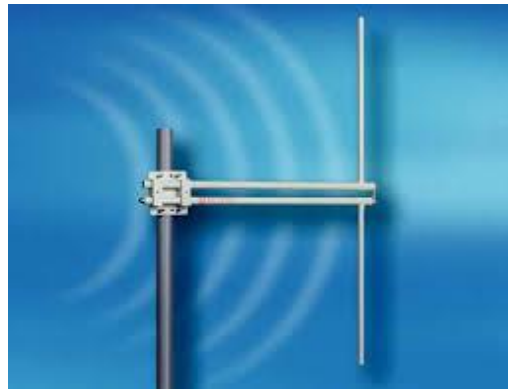


Figura 2.2 Antena de alambre: Dipolo

Dentro de este tipo de antena se encuentran:

- ✓ Antena dipolo
- ✓ Antena loop
- ✓ Antena tipo hélice

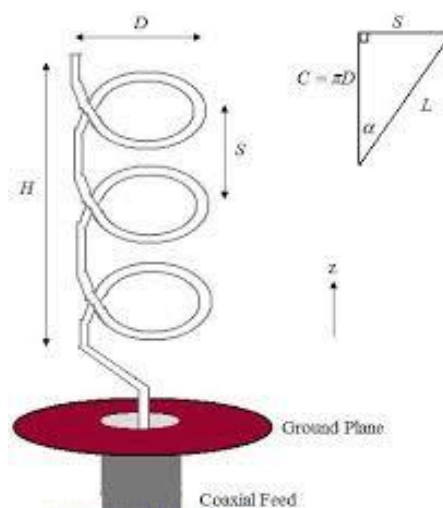
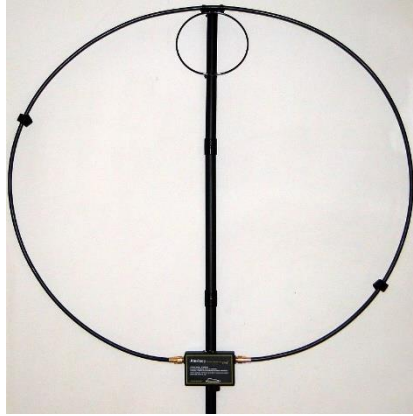


Figura 2.3 Antena de alambre: Hélice.



*Figura 2.4 Antena de alambre: Loop*

### *2.2.2 Antena de apertura*

Este tipo de antena se caracteriza por irradiar la energía al espacio a través de una abertura. Estas antenas están limitadas por paredes metálicas conductoras.



*Figura 2.5 Antenas de apertura*

### *2.2.3 Microstrip Patch Antenna*

Esta antena básicamente es una banda o parche metálico montado encima de un sustrato el cual esta sobre un ground (*Figura 2.5*) Uniéndose el parche con el ground a través de una línea de alimentación.

Tiene un gran cantidad de aplicaciones por su alto rendimiento como: Aeronaves, satelites, misiles, telefonos móviles y dispositivos electronicos.

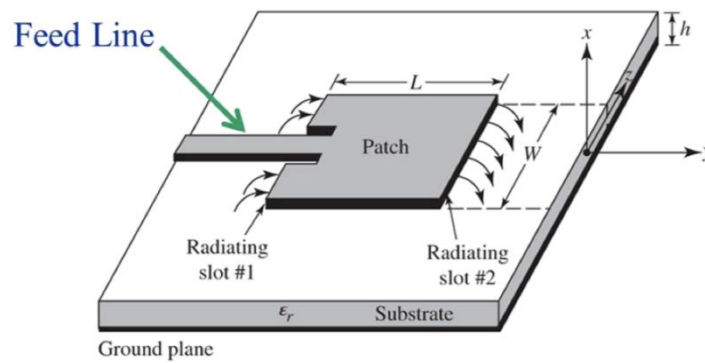


Figura 2.6 Microstrip Patch Antena [6]

Algunas ventajas de este tipo de antenas son:

- ✓ Simples y baratas para fabricarlas.
- ✓ Robustas mecánicamente.
- ✓ Versátiles.
- ✓ De bajo perfil y cómodas de portar.

Este tipo de antena es el que su utilizo para el diseño de la antena multibanda de este proyecto. Básicamente por las investigaciones previas que se han hecho sobre el tema, donde puede verse que este tipo de antenas es perfecto para poderse integrar en una camiseta por ejemplo y pasar desapercibida por completo.

#### 2.2.4 Arrey de antenas.

Este tipo de antenas es un arreglo geométrico compuestos de dos o más antenas. Lo que genera esto es que las señales de estas antenas se combinen para alcanzar un mejor desempeño de lo que lo haría una de estas antenas por separado.

Dentro de este grupo de antenas se puede mencionar la antena Yagi-Uda (Figura 2.6) y la Microstrip Patch Antena, la cual tiene mucha importancia en este proyecto porque es el tipo de antena idónea para este trabajo.

Se puede decir que este tipo de antena es principalmente usado para:

- ✓ Dirigir la señal hacia un solo lugar, ya que son muy directivas
- ✓ Aumento la ganancia

### 2.2.5 Antenas reflectoras

Las antenas reflectoras tienen las características de ser antenas de alta ganancia, esto para poder transmitir señales a millones de kilómetros. Por lo general, son de perfil parabólico, y la antena se sitúa en el foco del reflector. Las antenas gigantes utilizadas para observar el espacio son un gran ejemplo de esto (Las conocidas como antenas parabólicas) [3].

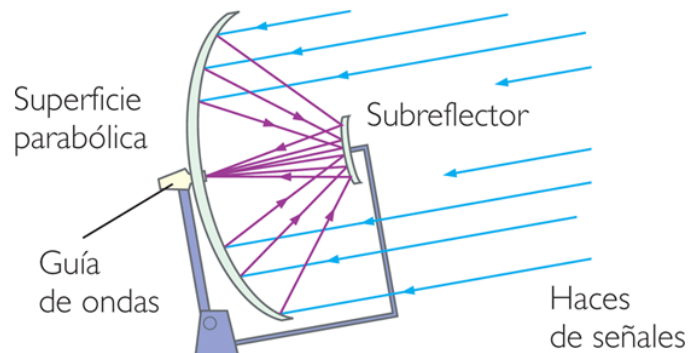


Figura 2.7 Partes de una antena reflectora [3].

### 2.2.6 Antenas de lente

El último tipo de antenas son compuestas por un lente que tiene como objetivo conformar la radiación de una determinada forma.

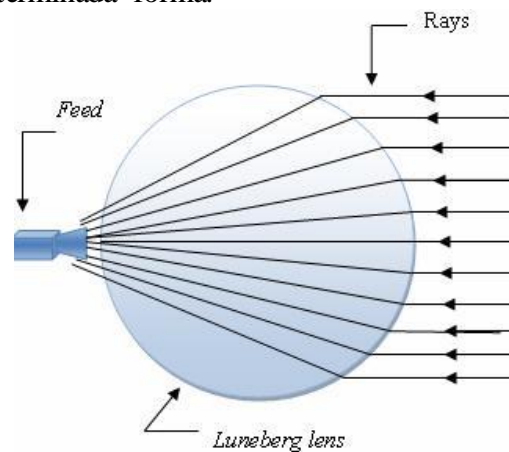


Figura 2.8 Partes de una antena de lente.

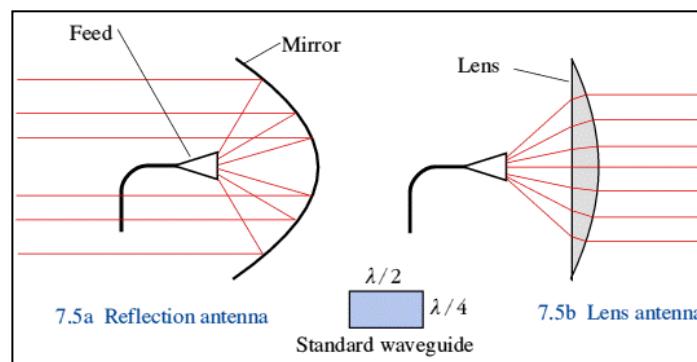


Figura 2.9 Comparación entre una antena de reflexión y una antena de lente.

## 2.3 Parámetros de diseño

En este apartado se definen parámetros característicos para el diseño de las antenas.

### 2.3.1 Impedancia

La impedancia de entrada ( $Z_A$ ) de una antena es la relación de la tensión entre la corriente que presenta en su terminal. Consta de una parte real ( $R_A$ ) y una parte imaginaria ( $X_A$ ), dependientes de la frecuencia [4].

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2-1)$$

Se necesita que tanto el transmisor, el receptor y la línea de transmisión que los une, estén adaptados, es decir, que tengan la misma impedancia de entrada. De esta manera la antena receptora radia a la máxima potencia que el transmisor entrega ya que es cuando las pérdidas son mínimas [4]. Las pérdidas se producen tanto pérdidas de potencia hacia el espacio, modeladas como resistencia de radiación  $R_r$ , como pérdidas óhmicas,  $R_L$ . De esta manera, y teniendo en cuenta la ley de Ohm, la potencia entregada ( $P_{in}$ ) a la antena es la potencia radiada ( $P_r$ ) y la de pérdidas ( $P_L$ ) [4].

$$R_A = R_r + R_L \quad (2-2)$$

$$P_{in} = P_r + P_L = I^2 R_r + I^2 R_L \quad (2-3)$$

donde  $I$  es el valor de la corriente de entrada de la antena.

### 2.3.2 Ganancia

La ganancia ( $G$ ) de una antena está directamente relacionada con la directividad. A diferencia de ésta, la ganancia tiene en cuenta las pérdidas, por lo que utiliza la potencia entregada [4].

$$G(\theta, \Phi) = \frac{\gamma(\theta, \Phi)}{P_{in}} 4\pi r^2 \quad (2-4)$$

### 2.3.3 Directividad

La directividad ( $D$ ) de una antena se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección  $\varphi(\theta, \Phi)$ , a una distancia dada, y la densidad de potencia que radiaría una antena isotrópica con la misma potencia y a esta misma distancia [4].

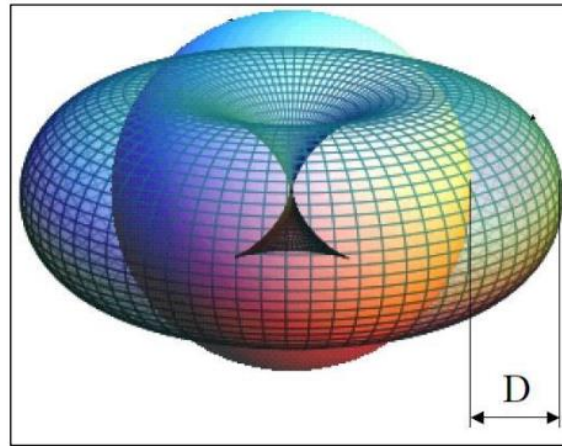


Figura 2.10 Directividad de una antena.

Generalmente se hablar de directividad de una antena es hablar de la dirección máxima de radiación de esta [4]:

$$D = \frac{Y_{MAX}}{P_{in}} 4\pi r^2 \quad (2-5)$$

La ganancia y la directividad vienen relacionados por la eficiencia de la antena que se define de la siguiente manera [4]:

$$\eta = \frac{G}{D} \quad (2-6)$$

#### 2.3.4 Parámetro S11 o pérdida de retorno

El parámetro más comúnmente utilizado para caracterizar el comportamiento de la frecuencia de la antena es la pérdida de retorno o coeficiente de reflexión (S11).

Este parámetro representa la cantidad de energía que se refleja en la antena y se mide típicamente en decibelios. Cuanto mayor sea el  $|S_{11}|$ , mayor será la reflexión. Por lo tanto, para  $|S_{11}| = 0$  dB toda la potencia se refleja en la antena y no hay radiación efectiva. Inversamente, cuando  $|S_{11}|$  es disminuido, hay cierta energía eficaz entregada a la antena y cierta radiación se presenta, así como pérdidas de la energía. El valor de nivel convencional para determinar un buen rendimiento de la antena es  $|S_{11}| = -10$  dB.

La gama de frecuencias satisfactoria  $|S_{11}| \leq -10$  dB determina el ancho de banda de la frecuencia de operación de la antena.

#### 2.3.5 Diagrama de radiación

Existen dos tipos de antenas según su manera de irradiar, estas puedan ser: Omnidireccionales o direccionales. Las omnidireccionales irradian en todas direcciones

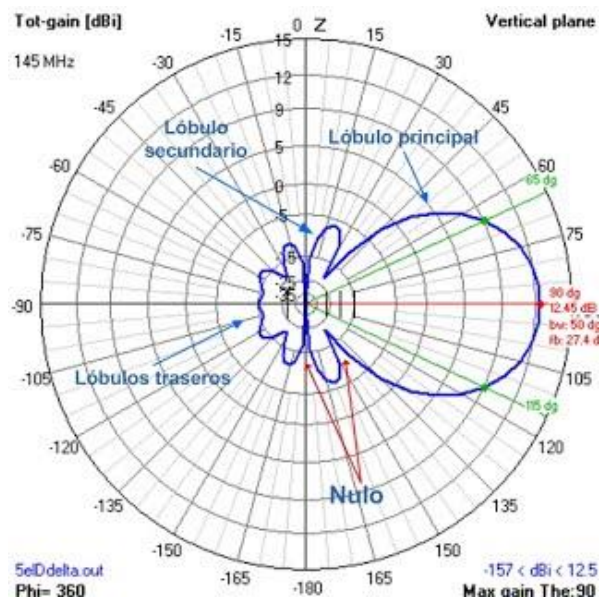
y las direccionales en una sola dirección en particular. Si se graficara la energía de esas antenas en un plano horizontal, se observaría que las omnidireccionales están en  $360^\circ$  y las direccionales, solo en una sección del total. A esto se le conoce como **diagrama de radiación**. El diagrama de radiación tiene una gran importancia porque permite visualizar gráficamente hacia qué dirección o direcciones irradiará la antena y con qué ángulo lo hará. Lo normal es representar el campo eléctrico en coordenadas esféricas, con la antena colocada en el origen de coordenadas y tomando como referencia el valor máximo de la magnitud. El resto serán valores relativos a él. [10]

Los diagramas de radiación cambian en función del modelo de antena. Las antenas direccionales representan un mayor alcance que las omnidireccionales.

Existen 2 modelos de gráficos que representan este patrón: En **elevación** (o vertical) y **Azímuth** (u horizontal). [10]

Los parámetros más importantes del diagrama de radiación (*Figura 2.12*) son los siguientes [10]:

1. **Dirección de apuntamiento:** Es la de máxima radiación.
2. **Lóbulo principal:** Es el margen angular en torno a la dirección de máxima radiación. Está comprendido entre dos mínimos relativos.
3. **Lóbulos secundarios:** Son el resto de los máximos relativos, de valor inferior al principal.
4. **Ancho de haz:** Es el margen angular de direcciones en las que el diagrama de radiación de un haz toma el valor de la mitad del máximo.
5. **Relación de lóbulo principal a secundario (SLL):** Es el cociente en dB entre el valor máximo del lóbulo principal y el valor máximo del lóbulo secundario.
6. **Relación delante-atrás (FBR):** Es el cociente en dB entre el valor de máxima radiación y el de la misma dirección y sentido opuesto.



*Figura 2.11 Diagrama de radiación de una antena. [10]*



### 2.3.6 Ancho de banda

Debido a su geometría finita, las antenas están limitadas a funcionar bajo las especificaciones deseadas para un rango de frecuencias limitado. A este rango de frecuencias de operación de la antena se lo conoce como ancho de banda.

Matemáticamente, el ancho de banda o Bandwidth (BW) responde a la ecuación 2-7,

$$BW = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_o} \quad (2-7)$$

En donde  $f_{max}$ ,  $f_{min}$  y  $f_o$  son las frecuencias máxima, mínima y central, respectivamente.

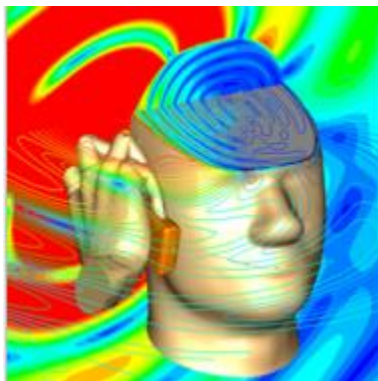
### 3. CTS Studio Suite 2018

El software utilizado para desarrollar este proyecto ha sido el CST Studio 2018. Este avanzado y sofisticado programa se utiliza para analizar, diseñar y optimizar componentes y sistemas a través del espectro electromagnético. En este capítulo se da a conocer este avanzado software las herramientas utilizadas para la creación de este proyecto.

#### 3.1 ¿Qué es el CST Studio Suite 2018?

Esta herramienta ofrece considerables ventajas de producto al mercado, como por ejemplo: Ciclo de desarrollo más cortos, prototipos virtuales antes de pruebas físicas y quizá lo más importante optimización previa a la experimentación.

El CST Studio Suite tiene una filosofía llamada “Tecnología completa” la cual consiste en que los solucionadores para aplicaciones a través del espectro electromagnético se contienen una sola amigable interfaz que puede ser emparejada en muchas diferentes combinaciones. Esto permite a los ingenieros tener la flexibilidad de analizar y optimizar todos los sistemas creados por múltiples componentes de una manera eficiente y sencilla. [11].



*Figura 3.1 Ejemplo de simulación SAR de un teléfono móvil [11]*

El programa permite modelar y simular antenas brindando resultados muy acertados de cualquier antena y el campo magnético al cual trabaja con relación a la situación que sea, tomando en cuenta posibles factores que pudieran afectar de alguna manera la operación del dispositivo. La antena puede crearse a partir de la unión de materiales que están cargados en la librería del programa, cuyos parámetros están ya definidos. También puede crearse a partir de nuevos materiales que no se encuentran en la librería, fijando parámetros reales del material como se hizo en este trabajo.

El CST Studio Suite tiene la habilidad de poder calcular la relación específica de absorción (SAR, Specific Absorption Rate) permitiendo chequear el grado al cual la antena irradia sobre el cuerpo humano para poder saber si la antena cumple con los estándares globales. Este tipo de simulación particularmente requiere un ordenador con rendimiento muy bueno para poder soportar los complejos cálculos. Cada simulación SAR realizada en este trabajo duraba entre 24 y 30 horas y no todas las simulaciones brindaban resultados satisfactorios por problemas de memoria lo cual provocó que demorara más tiempo del que se creía para poder diseñar la antena.

### 3.2 Herramientas utilizadas para el diseño.

Para diseñar y modelar la antena se necesitaron herramientas o funciones disponibles en el programa CST Studio Suite.

La primera barra de herramientas a utilizar recibe el nombre de "Modeling" donde se encuentran herramientas como por ejemplo "**Brick**", la cual permite la creación de cada capa individual de la antena. (Figura 3.2)

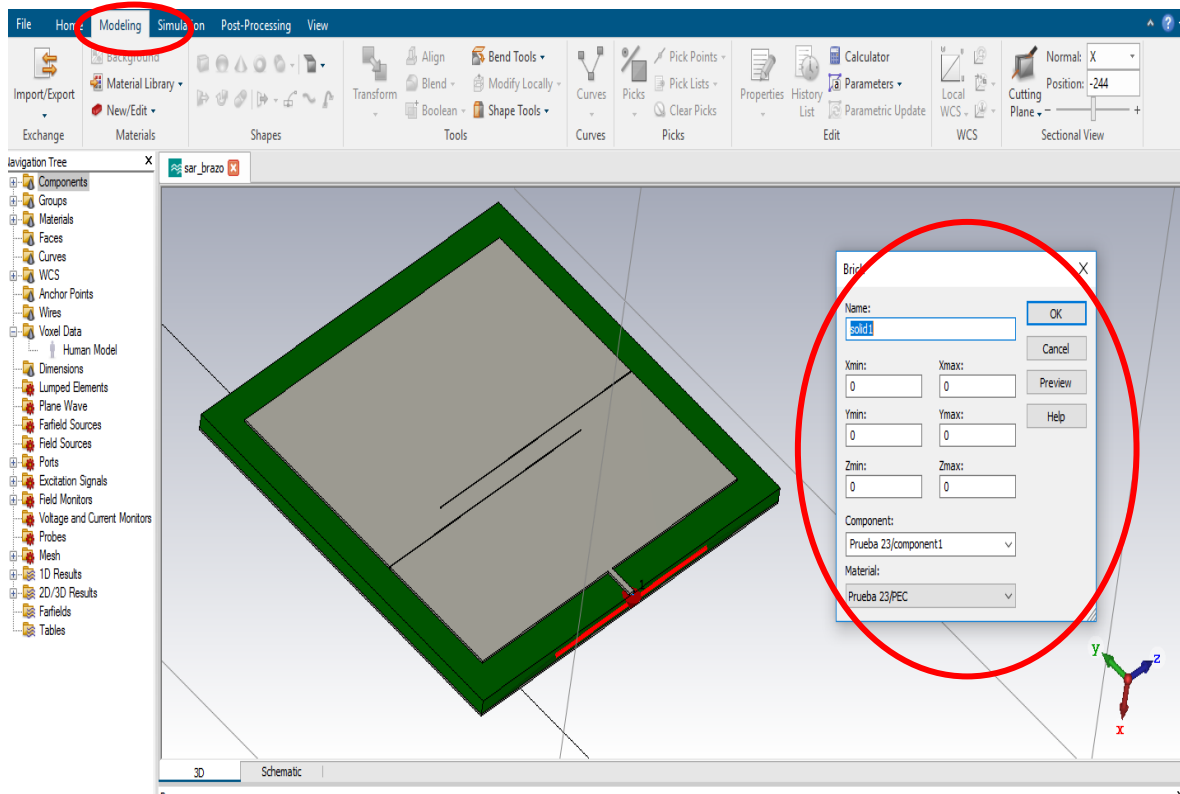


Figura 3.2 Herramienta "Brick".

Esta herramienta es una manera fácil que permite dibujar la capa deseada en el sistema de coordenadas de la malla. Al mismo tiempo, la capa creada puede adquirir las propiedades de cualquier material de la amplia gama de materiales que existen en librería del programa como por ejemplo: Cobre, Algodón, Grafeno, etc. (Capítulo 4.1)

También pueden añadirse nuevos materiales y declarar sus propiedades eléctricas y magnéticas. Además de las dimensiones de la capa se puede definir el espesor o la altura en el plano Z.

Otras funciones importantes que se han utilizado fueron las opciones "**Transform**" y "**Boolean**", que permiten el corte y/o unión de ciertas figuras en la última capa de la antena, el parche o patch.

A manera de dar aún más realismo al modelo se utilizó también la función "**Bend**" (Figura 3.3), con la cual se curvó la antena a varios radios específicos. Esto es porque los materiales de la antena son flexibles y en la realidad se curvarán con seguridad y es necesario saber cómo cambian los parámetros cuando esto suceda.

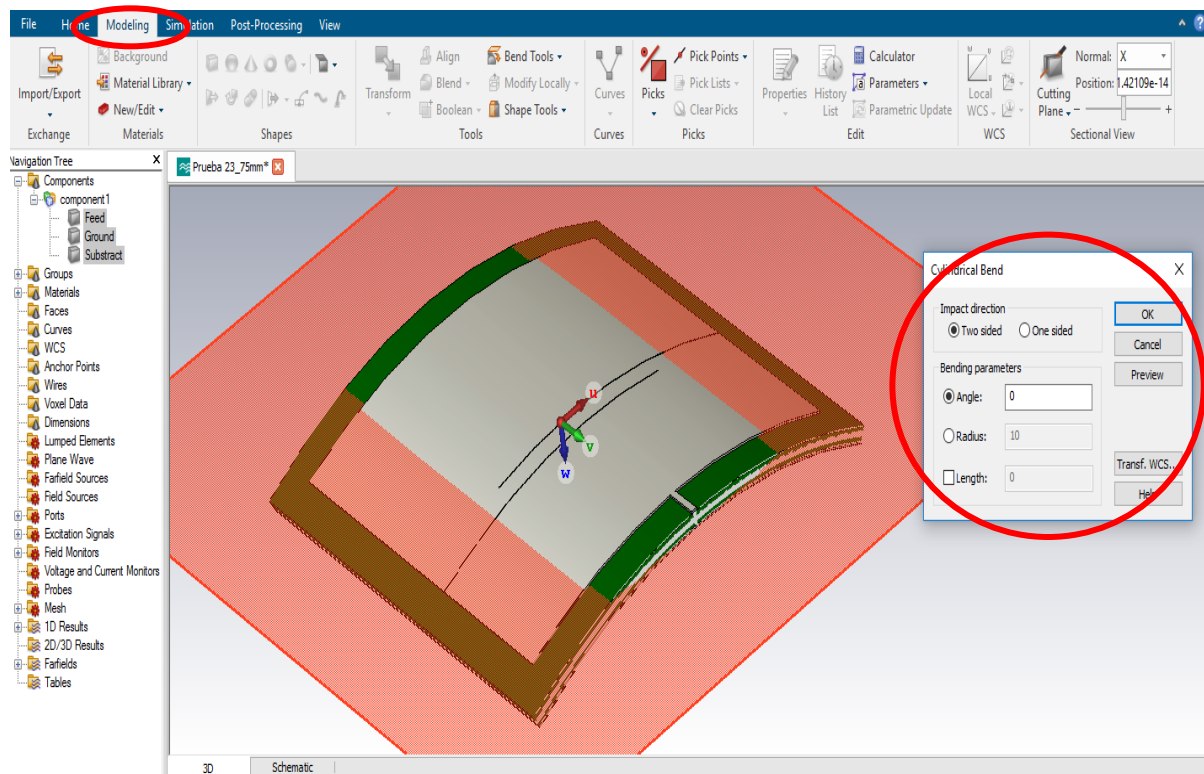


Figura 3.3 Herramienta "Blend"

A partir de aquí se abre la pestaña “Simulation” para comenzar con los parámetros de simulación. Lo primero que se debe de hacer es utilizar la herramienta “**Discrete port**” (Figura 3.4) para la creación del puerto de alimentación de la antena. La creación de puntos se lleva a cabo al declarar las coordenadas donde se quiere ubicar los puntos o simplemente seleccionando primero el punto o eje de inicio y el punto o eje final con dos clicks. Para terminar, se da Ok en la ventana de Discrete Port y la antena ya está lista para que se puedan aplicarse las demás herramientas de simulación.

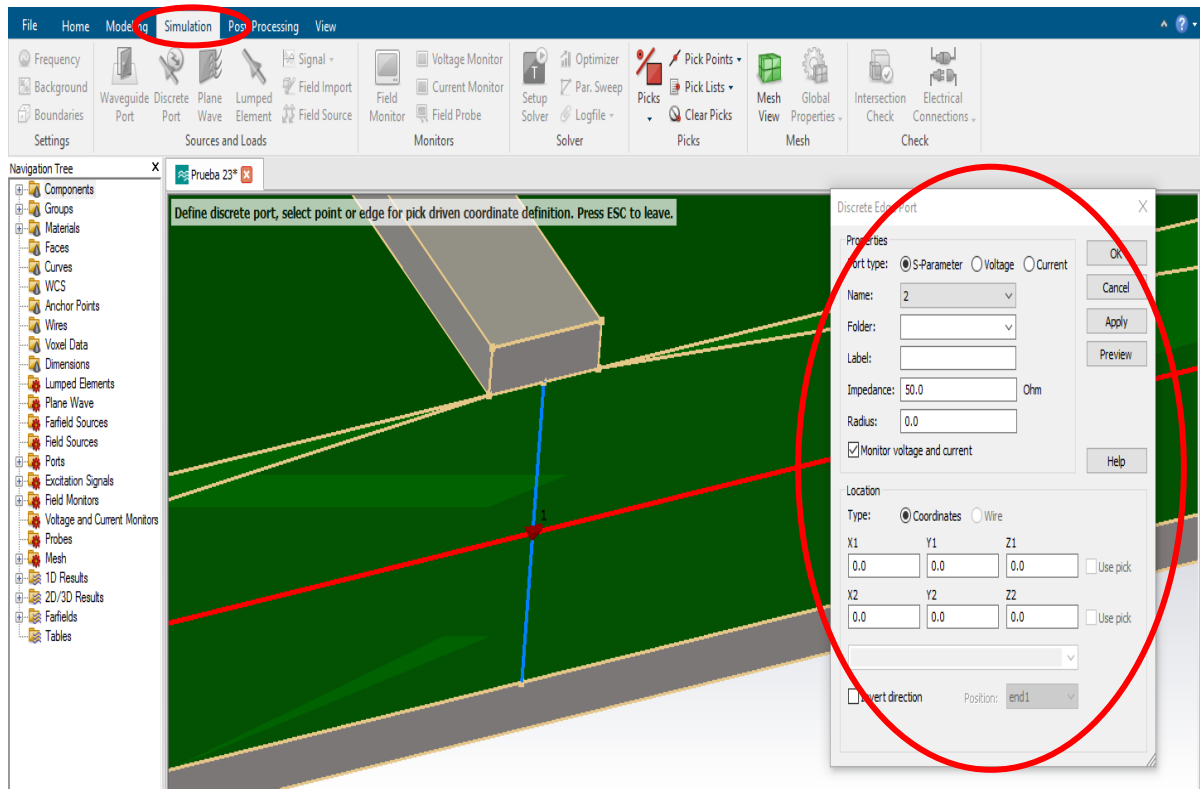


Figura 3.4 Herramienta "Discrete port"

Para simular la antena es necesario definir qué resultados son los que se quieren obtener. La herramienta **"Field Monitor"** (Figura 3.5) sirve para definir las especificaciones de la simulación. Esta herramienta tiene las siguientes opciones de simulación:

- ✓ E-Field
- ✓ H- Field and Surface Current
- ✓ Farfield/RCS
- ✓ Field Source
- ✓ Surface Current
- ✓ Power Flow
- ✓ Current density
- ✓ Power Loss Density/SAR
- ✓ Electric Energy Density
- ✓ Magnetic Energy Density

Las utilizadas en este proyecto han sido Farfield/RCS, el cual nos brinda el diagrama de radiación en 2D y 3D, como también la directividad y la ganancia de la antena. Para la parte de los resultados SAR que se explica en el siguiente apartado, se utilizó el monitor de campo Power Loss Density/SAR.

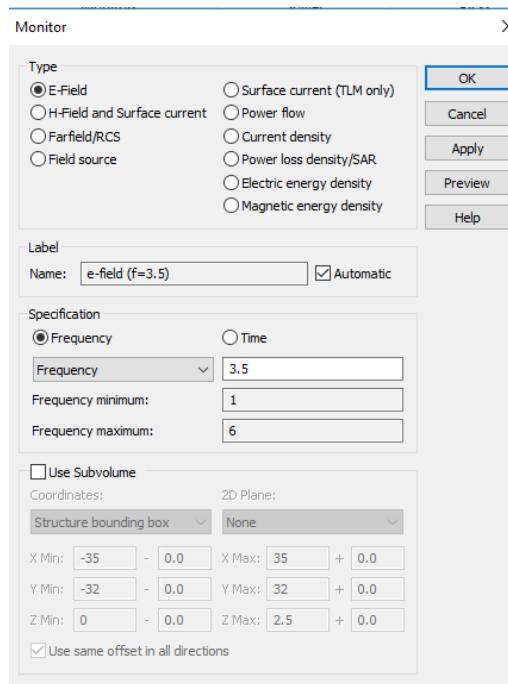


Figura 3.5 Herramienta "Field Monitor"

Por último, se abre la herramienta llamada "Setup Solver" (Figura 3.6) que de igual manera se encuentra en la barra de herramientas de "Simulation". En esta ventana se define el mallado con el que se desea realizar la simulación como también la precisión de esta en unidades de dB. Entre más precisos son los resultados, más tiempo las simulaciones tardan en realizarse.

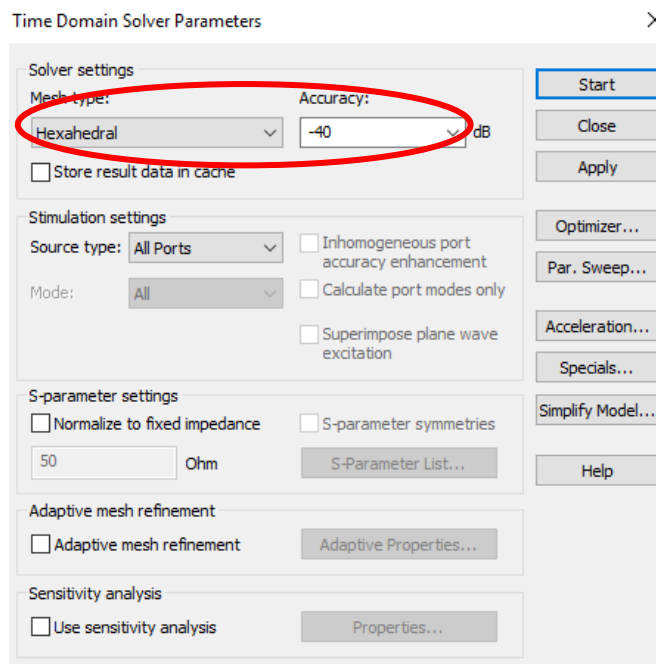


Figura 3.6 Herramienta "Setup Solver".

### 3.3 Cálculo SAR

El cálculo SAR se puede realizar como un postproceso después de la simulación. Se debe definir un monitor de densidad de pérdida de energía (Power Loss Density) para calcular los valores y campos de SAR. [11]

La tasa de absorción específica (SAR) se define como el tiempo derivado de la energía incremental (DW) absorbida por (disipado) una masa incremental (DM) contenida en un elemento de volumen (DV) de una densidad de masa ( $\rho$ ) determinada. [11]

$$SAR = \frac{d}{dt} \left( \frac{dW}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left( \frac{dW}{\rho dV} \right) \quad (3-1)$$

$$PLD = \frac{d}{dt} \left( \frac{dW}{dV} \right) \quad (3-2)$$

El valor SAR se expresa en unidades de vatios por kilogramo (W/kg). El valor de densidad de pérdida de energía (PLD) se expresa en unidades de vatios por metro cúbico (W/m<sup>3</sup>). [11]

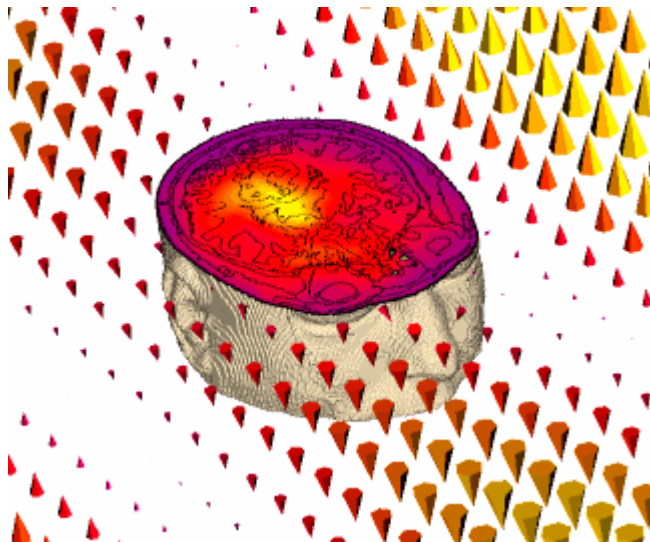


Figura 3.7 Relación de absorción específica (SAR) [11]

El valor SAR promediado para el cuerpo entero se obtiene dividiendo la potencia total absorbida en el cuerpo humano por el peso corporal completo. También es posible definir un sub-volumen por selección o por números. [11]

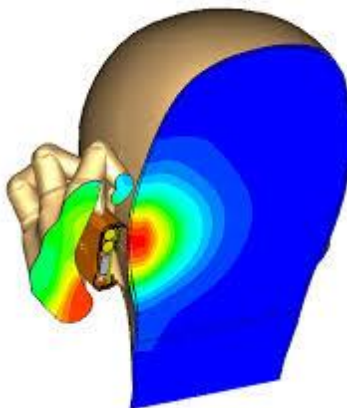
El SAR se da como un valor numérico por elemento de volumen y se convierte en una función de distribución de espacio. Para esta función, el valor medio de masa en el volumen de tejido arbitrario se denomina SAR local. Los valores locales típicos de SAR se promedian en masas de tejido de alrededor de 10g especificadas por la agenda No. 89

y CENELEC 1995 del Consejo de tecnología de las telecomunicaciones, mientras que el valor de 1g es adoptado por ANSI/IEEE c 95.1-1992 de los Estados Unidos. Se utiliza un volumen de promedio de rectángulo. [11]

En los Estados Unidos de América, la FCC exige un valor de SAR igual o inferior a 1.6 W/kg promediados en un volumen de 1 gramo de tejido [12].

Mientras que la UE, y el resto del mundo, fija como límite 2 W/kg promediados en 10 gramos de tejido. [12]

La TLM Solver tiene una calculadora de SAR incorporada que calcula el punto SAR y el SAR promediado sobre 1g y 10g cuando se ha definido un monitor de campo de densidad de pérdida de energía (Power Loss Density). Este cálculo no cumple con los estándares recientes. El SAR promedio calculado para una célula se considera inválido si la región de promedio discreta que se cultiva alrededor de esa célula incluye más del 10% de aire o el centro de cada célula en una sola cara de la región promediada está completamente en el aire. Si el SAR promedio calculado para una celda se considera inválida, se tomará el SAR máximo calculado para cualquier celda cuya región de promedio encierre la celda no válida. [11]

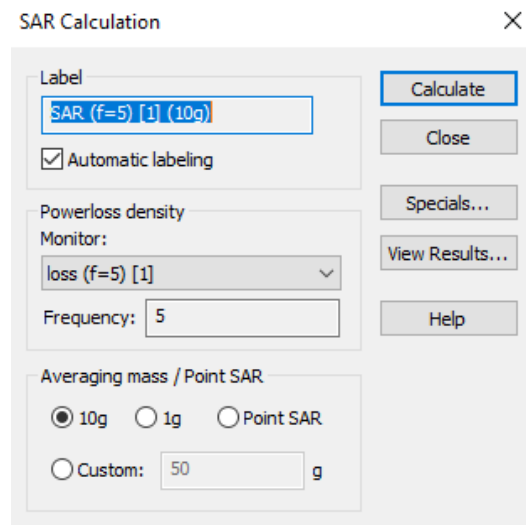


*Figura 3.8 Ejemplo del SAR para radiaciones de un móvil.*

Después de comprender cómo se genera esta simulación y de crear un monitor para la densidad de pérdida de energía a las frecuencias deseadas (2,4 GHz Y 5GHz en este caso) y esperar un tiempo de simulación promedio de 6 horas para las simulaciones a 2,4 GHz y 12 para las de 5 GHz se procede a utilizar la herramienta “**SAR Calculation**” ubicada en la barra de herramientas de “Post-Processing”

En esta ventana se definen los parámetros para la simulación del SAR. Se debe de seleccionar como parámetros fundamentales la masa promedio de tejido, la cual como se ha visto antes puede ser a 1g o 10g (En este trabajo se han realizados todas estas simulaciones a 10g), la frecuencia de operación de la antena (2,4 GHz y 5GH en este trabajo) y en el botón “Specials” colocar la potencia que se le dará a la antena para realizar la simulación (0,5 W para este caso)





*Figura 3.9 Herramienta "SAR Calculation"*

Después de saber conocer el uso de las herramientas que brinda este software y cómo utilizarlas, se comienza con el modelado y simulación de la antena multibanda.

#### 4. Modelado y simulación de la antena multibanda.

Actualmente, las antenas ayudan a facilitar las tareas del día a día sin muchas veces darnos cuenta, por ejemplo: Comunicación (Móviles, comunicación militar, torre de control-avión), salud de pacientes, entretenimiento (TV y radio), deporte, entre otras. Sin embargo, la tecnología avanza y al igual que antes quizá imaginar un teléfono móvil con internet por medio de Wi-Fi era impensable, de la misma manera quizá hoy en día cuesta pensar en alguna prenda de vestir que tenga un circuito electrónico integrado donde se necesite con seguridad una antena.

La misión de este proyecto fue diseñar y modelar una antena que trabaje con dos frecuencias, Bluetooth y Wi-Fi, las cuales son 2,4 GHz y 5 GHz [1] respectivamente y que además pueda adaptarse estéticamente a un textil siendo flexible y ligera. Por supuesto, también es necesario asegurarse que los niveles de radiación de la antena estén dentro de los estándares europeos y que no afecte de ninguna manera la salud del usuario, por este motivo se realizaron tres simulaciones SAR en diferentes partes del cuerpo, las cuales fueron: Pecho, espalda y brazo derecho, con el objetivo de saber en qué parte del cuerpo la antena opera lo más cerca a sus condiciones en vacío, es decir, las características que presenta la antena en no está cerca del cuerpo humano, y que en esa zona la radiación afecte nula o levemente la salud del usuario.

En este capítulo se describe todo el proceso realizado para el diseño la antena.

##### 4.1 Diseño de la antena.

Por la facilidad de diseño, buen desempeño, y estética se decidió que el tipo de antena que se diseño es una microstrip patch. A continuación, se describirán los materiales que se utilizaron para la creación de la misma y por qué se utilizaron. Después de esto se explica cómo se obtuvieron las medidas finales de la antena finalizando con la simulación y resultados.

###### 4.1.1 Materiales

Como se describió en el apartado 3.2.1 y como se muestra en la *figura 4.1* las antenas microstrip patch se componen en 4 partes:

- ✓ Ground
- ✓ Sustrato
- ✓ Patch o parche
- ✓ Alimentación

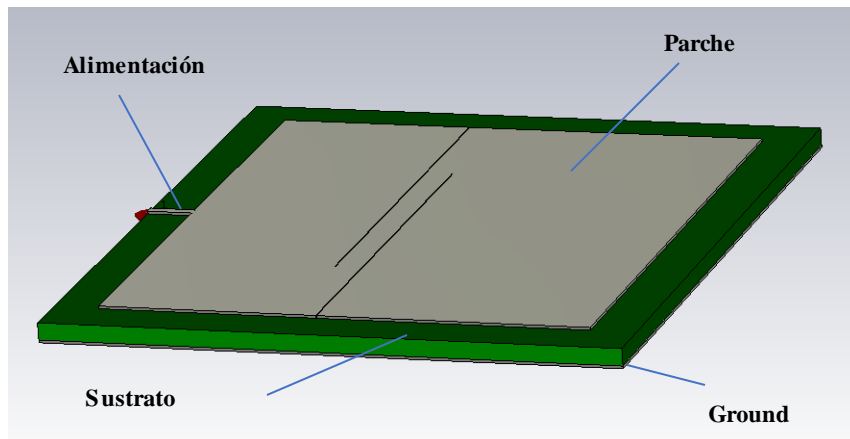


Figura 4.1 Partes de una antena microstrip patch

Como se sabe, las antenas básicamente se componen de dos materiales conductores separados por un no conductor. Para este caso, todas las partes conductoras (Alimentación, parche, sustrato y tierra) se simularon con un material que se encuentra en la librería del CST Studio Suite llamado PEC (Perfect Electrical Conductor) [5]. Como su nombre lo dice, es un conductor ideal con parámetros ya establecidos por software y va muy bien en estas simulaciones.

Todos los componentes son importantes sin duda alguna pero el sustrato que se utilizara en esta antena es el que permite que la antena pueda ser flexible y ligera. El material utilizado para el sustrato de esta antena es un tipo de algodón llamado *Material 1* (Figura 4.2) en todas las simulaciones. Este material brindado por el tutores un material en prueba para este tipo de aplicaciones cuyos parámetros son:

- ✓ **Constante dieléctrica  $\epsilon_r$ :** 1,2
- ✓ **Tangente delta de pérdida:** 0,0013

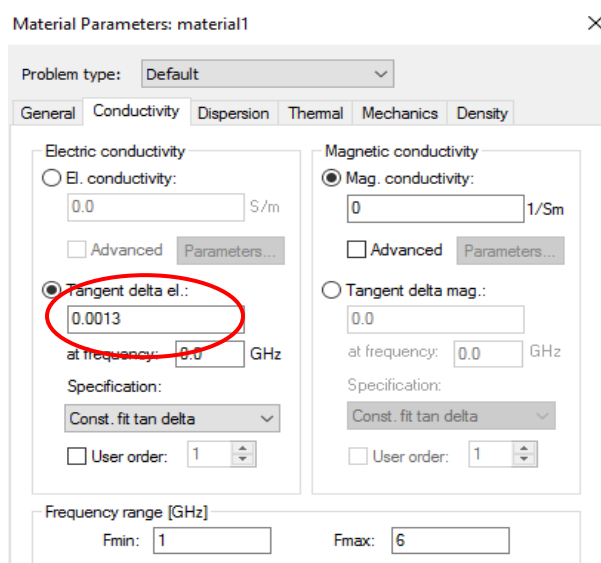


Figura 4.2 Parámetros del material1: Tangente delta de pérdida

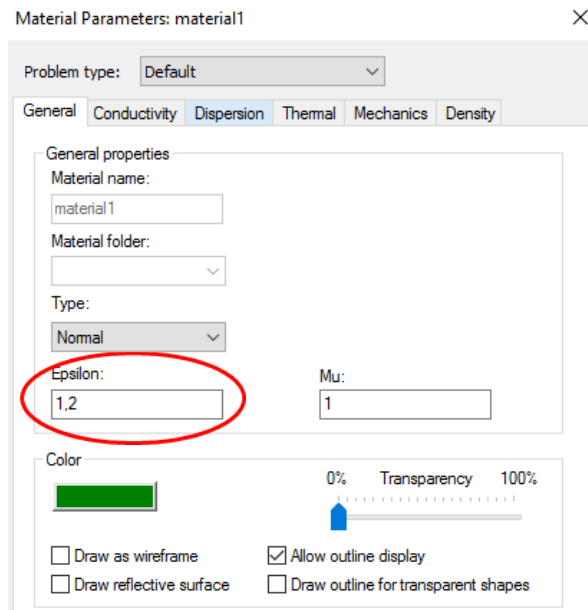


Figura 4.3 Parámetros del material1. Epsilon

#### 4.1.2 Dimensiones físicas

El segundo paso fue obtener las medidas físicas que deberían de tener estos materiales en conjunto. Para esto se utilizó una aplicación llamada Microstrip Patch Antenna Solver [13], ya que es muy práctica para el diseño de este tipo de antenas, solo se necesita saber que 3 datos para calcular la medida del parche y estos son:

- La constante dieléctrica.
- La altura del sustrato.
- Frecuencia de operación

Estos datos se colocan en el solver y calcula, a partir de las fórmulas 1, 2 y 3, el ancho y largo del parche como se ve en la figura 4.4.

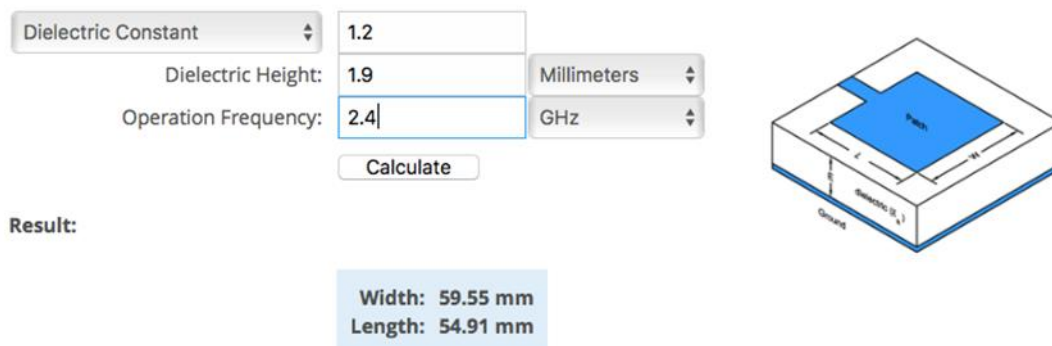


Figura 4.4 Microstrip Patch Antenna Solver [13]

$$Width = \frac{c}{2f_o \sqrt{\frac{\epsilon_R + 1}{2}}} \quad (4-1)$$

$$Length = \frac{c}{2f_o \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 0.824h \left( \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)} \right) \quad (4-2)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_R + 1}{2} + \frac{\epsilon_R - 1}{2} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left( \frac{h}{W} \right)}} \right] \quad (4-3)$$

Siendo,

**c:** La velocidad de la luz.

**f<sub>o</sub>:** Frecuencia de operación.

**ε<sub>R</sub>:** Constante dieléctrica.

**h:** Espesor del sustrato.

**W:** Ancho del sustrato.

Hasta este punto, se obtuvo una antena que operara a la frecuencia de 2,4 GHz (Bluetooth) [6] con los parámetros del sustrato a utilizar. Sin embargo, esto es el principio de más de cientos de simulaciones ya que ahora además de lograr que la antena no pierda su operación en 2,4 GHz, también debe ajustarse para que trabaje a 5GHz.

En algún momento del proyecto se buscaba que la antena operara a 3 frecuencias diferentes incluyendo Wi-Max además de Bluetooth y Wi-Fi, sin embargo, fue muy complicado conseguirlo ya que al ajustar una frecuencia (Al modificar las dimensiones del parche) las otras dos también se modificaban y debido que cada simulación dura al menos 12 horas el tiempo para poderlo realizar era justo. A partir de aquí se decidió enfocar el proyecto para que la antena operara a las frecuencias antes mencionadas.

No merece la pena mostrar la infinidad de simulaciones que se realizaron para alcanzar el modelo final, por lo tanto, en el siguiente apartado se muestran los resultados de la simulación del modelo de la antena final.

#### 4.1.3 Simulación antena plana

Como se mencionó anteriormente, se realizaron aproximadamente 125 simulaciones para llegar a una antena que operara bien a 5GHz tratando de mantener lo mejor posible su operación a 2,4GHz se obtuvo modelo que aparece en la figura 4.5. El material verde es el sustrato y todo lo que aparece en color gris son todos los componentes conductores (PEC).

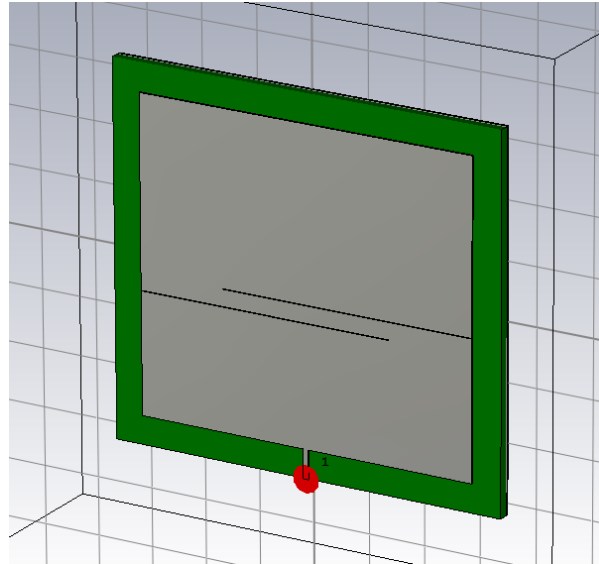


Figura 4.5 Diseño final de la antena

Como se observa en la figura 4.6 y figura 4.7, las medidas de que posee este modelo son perfectamente adecuadas para poderse integrar en alguna camiseta, por ejemplo, sin tener problemas de estética o de sobredimensionamiento.

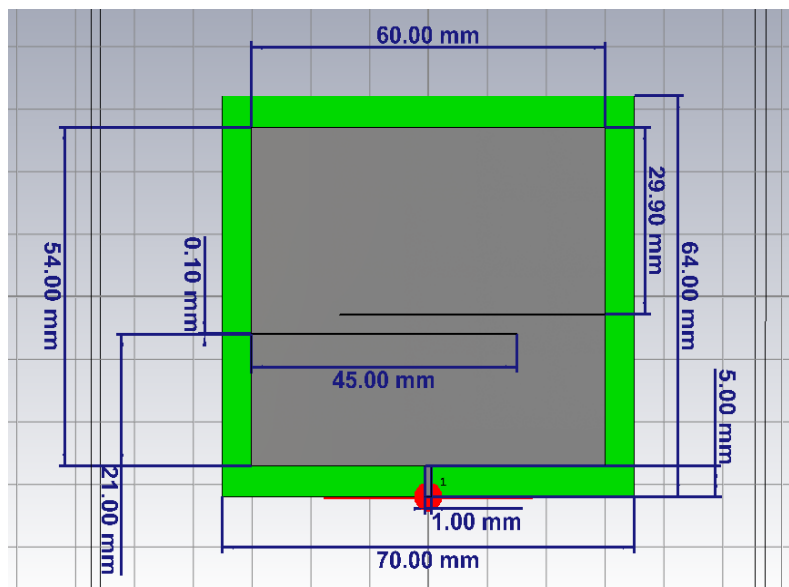


Figura 4.6 Dimensiones del diseño de la antena final : Vista Superior

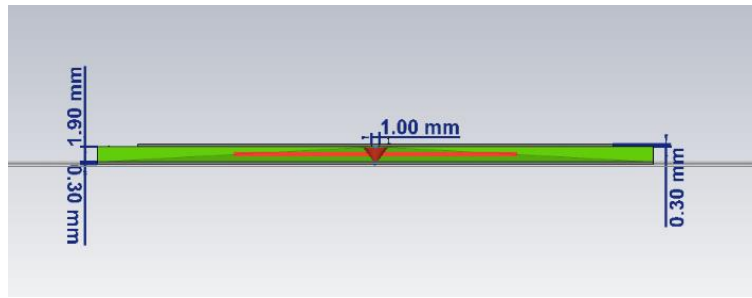


Figura 4.7 Dimensiones del diseño de la antena final : Vista frontal

Es importante mencionar que a medida que analizaban los resultados de las simulaciones para obtener la antena que operara a 2,4 GHz y 5GHz, se llegó a la conclusión que si al parche original se le ramifica, como el que se muestra en la *figura 4.8*, en lugar de ser una sola masa, la antena no solo cambia su frecuencia de operación original, sino que también aparece otras y depende el largo y ancho de estas ramas las nuevas frecuencias de operación (*Figura 4.9*). Por este motivo se llegó a la forma del parche (Las dos ranuras de en medio) hasta llegar a la que se muestra en la *figura 4.5*.

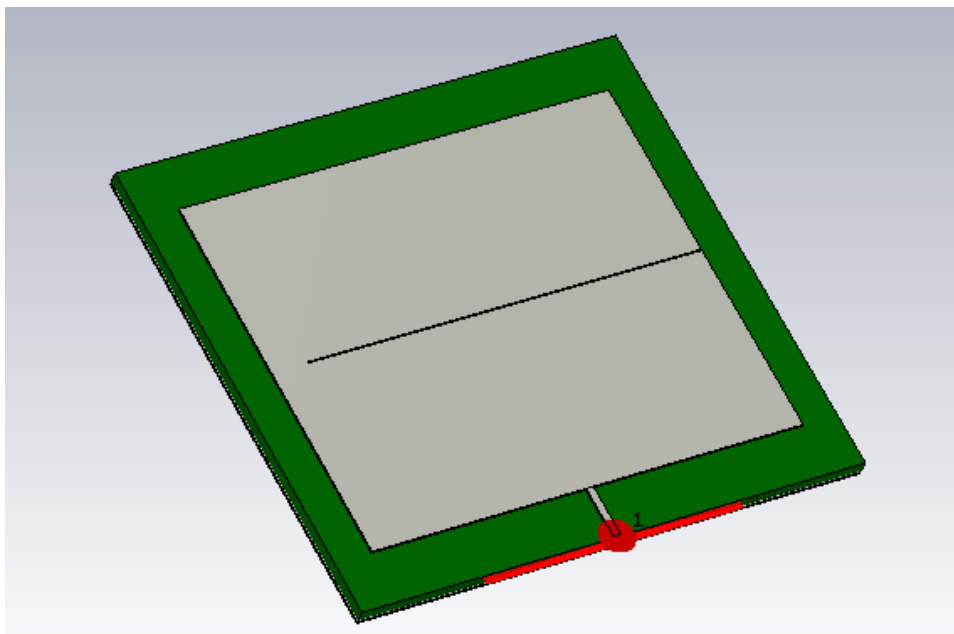
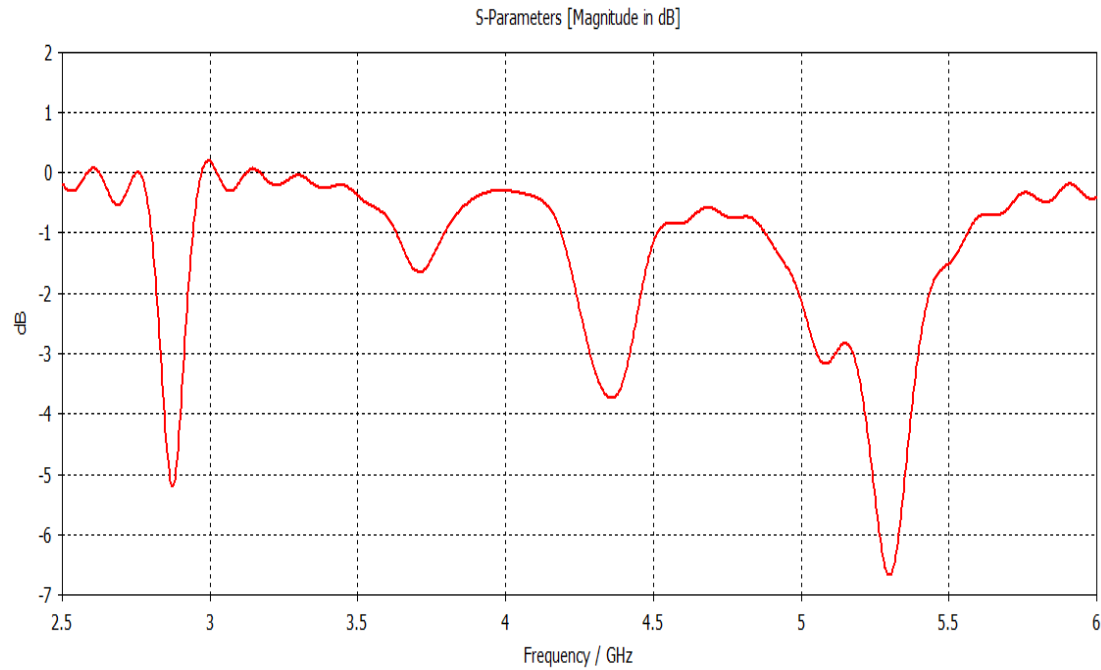


Figura 4.8 Diseño de la antena con una sola ranura en el medio.



*Figura 4.9 Parámetro S11 de la antena con una sola ranura.*

En el apartado 2.3 se mencionaron los parámetros de diseño que se deben de tomar en cuenta a la hora de diseñar una buena antena. A continuación, se muestra los resultados obtenidos con el modelo mostrado.

#### 4.1.3.1 Parámetro S11 del modelo.

El objetivo con este parámetro es lograr que las frecuencias de operación deseadas, las cuales son 2,4 GHz para Bluetooth y 5 GHz para Wi-Fi estén por debajo de los -10 dB. (Apartado 2.3)

Las figuras 4.10 y 4.11 presentan el diagrama de S11 de la antena modelo trabajando a en un rango de 2 a 6 GHz. Como se puede observar, para las frecuencias de operación deseadas se alcanzaron los dB propuestos. Los resultados fueron:

- ✓ Para 2,4 GHz (Bluetooth): **-10.27 dB**
- ✓ Para 5 GHz (Wi-Fi): **-13.47 dB**



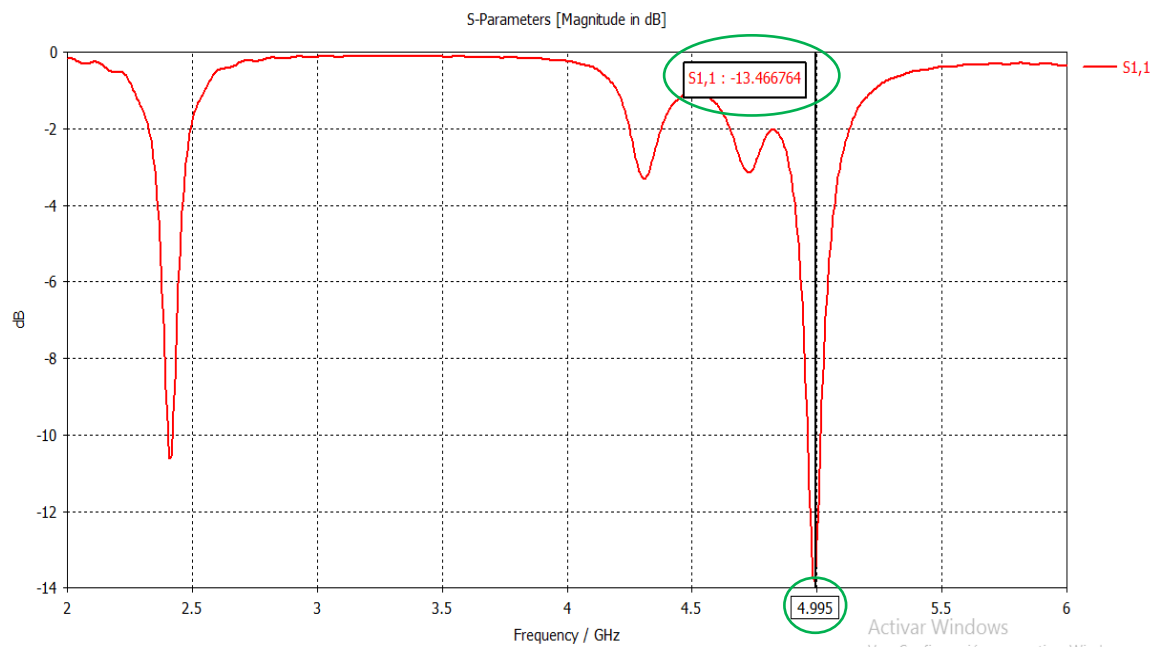


Figura 4.10 Parámetro  $S_{11}$  de la antena modelo a 5GHz.

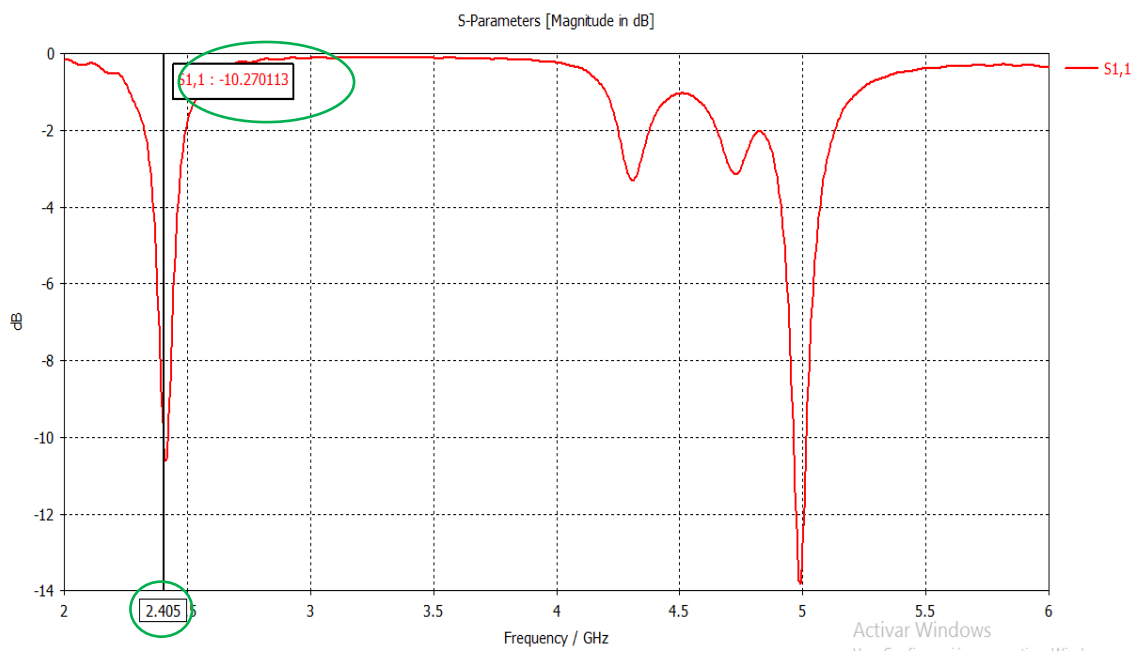


Figura 4.11 Parámetro  $S_{11}$  de la antena a 2,4 GHz.

4.1.3.2 Diagramas de radiación.

Las ilustraciones (Figura 4.12 y 4.13) muestran los de diagramas de radiación en 3D y en forma polar. Los resultados del diagrama de radiación que emite la antena operando a 2.4 GHz son los siguientes:

<b>Frecuencia</b>	<b>2.4 GHz</b>
<b>Magnitud del lóbulo principal</b>	<b>7,67 dB</b>
<b>Dirección del lóbulo principal</b>	<b>0 grados</b>
<b>Ancho de haz (3 dB)</b>	<b>73,2 grados</b>

Tabla 4-1 Parámetros del diagrama de radiación de la antena a 2,4 GHz

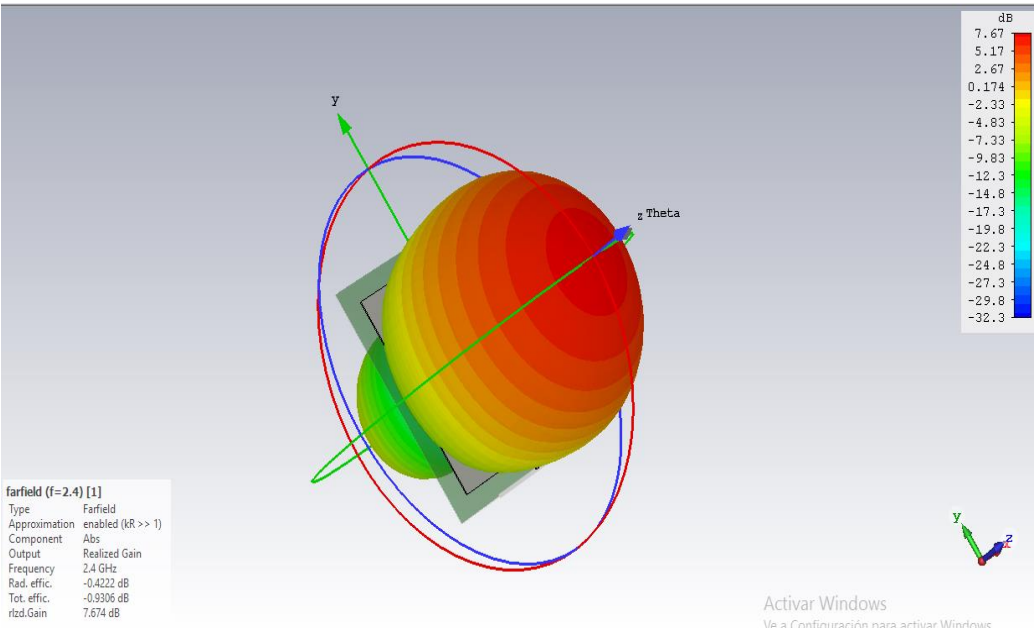


Figura 4.12 Diagrama de radiación de la antena a 2,4 GHz: 3D

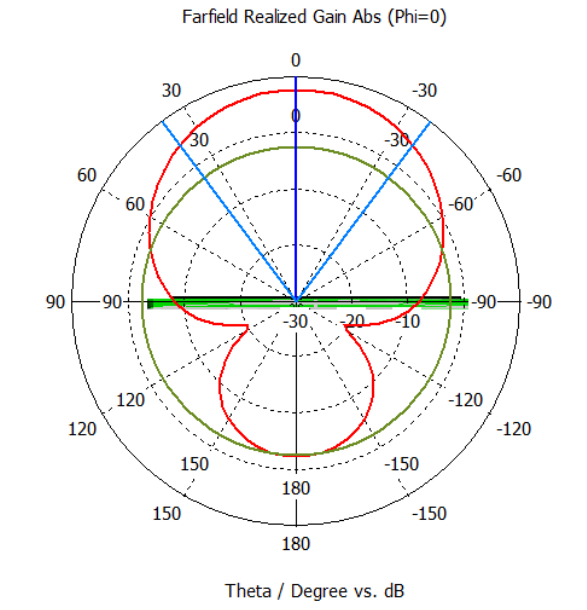


Figura 4.13 Diagrama de radiación de la antena a 2,4 GHz: Polar

Las ilustraciones (Figura 4.10 y 4.11) muestran los de diagramas de radiación en 3D y en forma polar. Los resultados del diagrama de radiación que emite la antena operando a 5,0 GHz son los siguientes:

Frecuencia	5 GHz
Magnitud del lóbulo principal	3,93 dB
Dirección del lóbulo principal	50 grados
Ancho de haz (3 dB)	48,2 grados

Tabla 4-2 Parámetros del diagrama de radiación de la antena a 5 GHz.

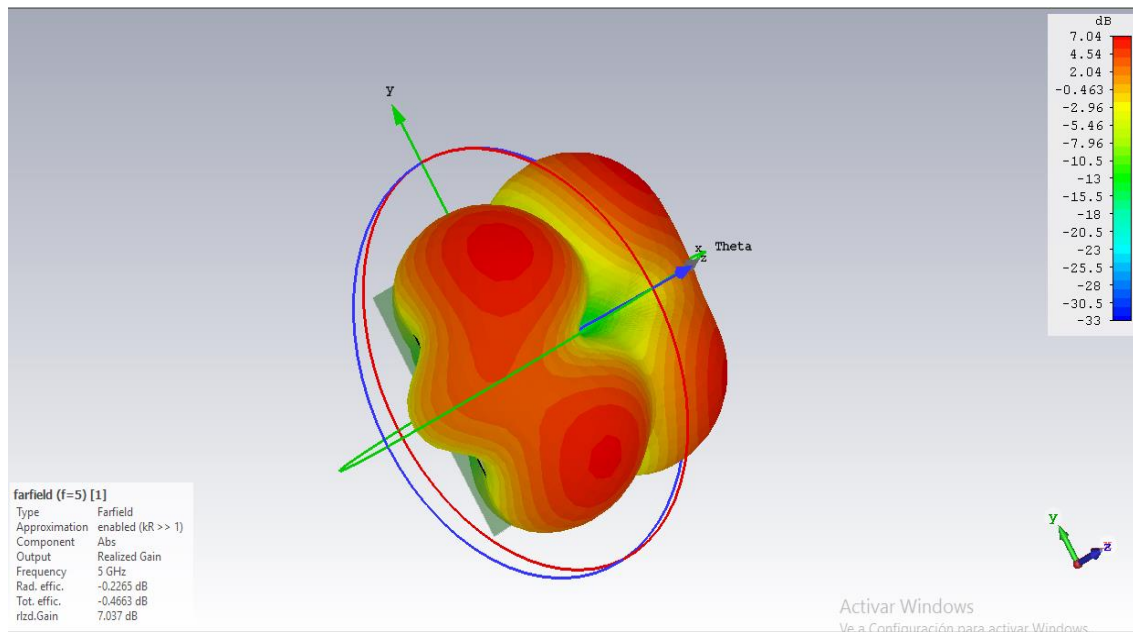


Figura 4.14 Diagrama de radiación de la antena a 5,0 GHz: 3D

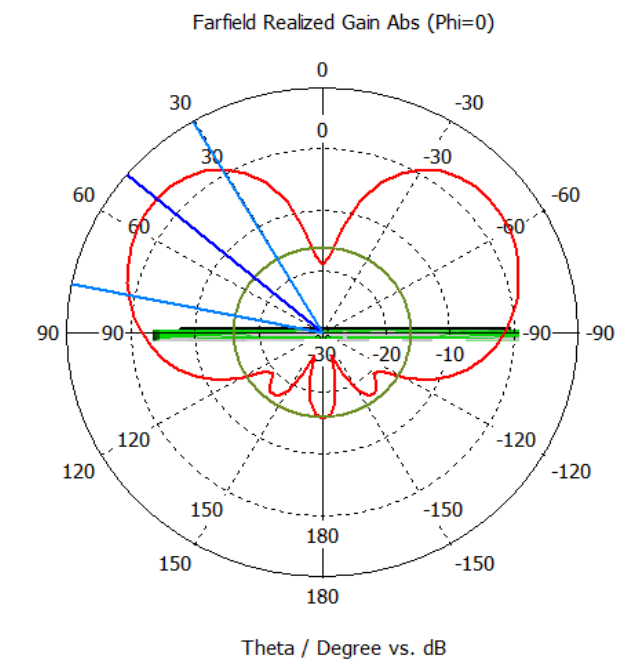


Figura 4.15 Diagrama de radiación de la antena a 5GHz: Polar

#### 4.1.3.3 Directividad del modelo.

En la figura 4.16 se muestran los resultados de directividad obtenidos para 2,4 GHz y 5 GHz, respectivamente.

farfield (f=2.4) [1]		farfield (f=5) [1]	
Type	Farfield	Type	Farfield
Approximation	enabled (kR >> 1)	Approximation	enabled (kR >> 1)
Component	Abs	Component	Abs
Output	Directivity	Output	Directivity
Frequency	2.4 GHz	Frequency	5 GHz
Rad. effic.	-0.4222 dB	Rad. effic.	-0.2265 dB
Tot. effic.	-0.0206 dB	Tot. effic.	-0.4663 dB
Dir.	8.605 dBi	Dir.	7.503 dBi

Figura 4.16 Resultados de directividad a 2,4 GHz y 5GHz de la antena.

#### 4.1.3.4 Ganancia delo modelo.

En la figura se muestran los resultados de ganancia obtenidos para 2,4 GHz y 5 GHz, respectivamente.

farfield (f=2.4) [1]		farfield (f=5) [1]	
Type	Farfield	Type	Farfield
Approximation	enabled (kR >> 1)	Approximation	enabled (kR >> 1)
Component	Abs	Component	Abs
Output	Realized Gain	Output	Realized Gain
Frequency	2.4 GHz	Frequency	5 GHz
Rad. effic.	-0.4222 dB	Rad. effic.	-0.2265 dB
Tot. effic.	-0.0206 dB	Tot. effic.	-0.4663 dB
rlzd.Gain	7.674 dB	rlzd.Gain	7.037 dB

Figura 4.17 Resultados de ganancia a 2,4 GHz y 5GHz de la antena.

#### 4.1.4 Simulación antena doblada

Para agregar más realismo a los resultados, en este estudio se ha doblado la antena, como se muestra en la figura 4.18, para 3 diferentes radios de 75mm. 85mm y 100mm. De esto modo, puede analizarse que tanto se desvían de los resultados de la antena cuando esta plana.

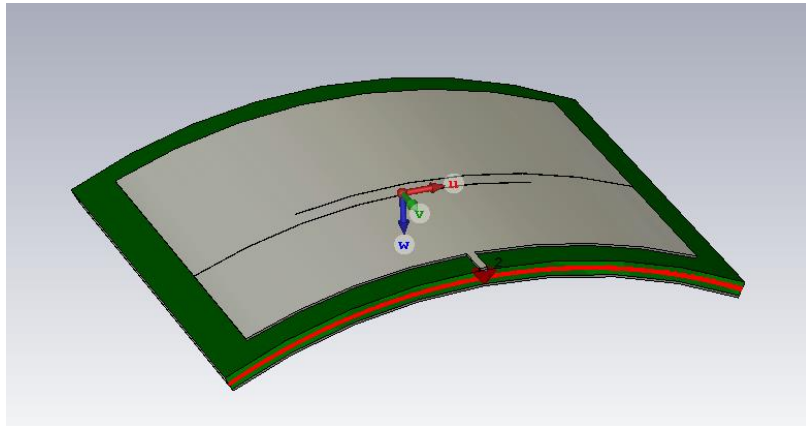


Figura 4.18 Antena curvada

A continuación, se muestran los resultados del parámetro  $S_{11}$ , ganancia, directividad y diagrama de radiación para cada uno de los radios a los que se ha doblado la antena.

### Radio de 100 mm

Como observa en la figura 4.19, el coeficiente de reflexión o parámetro  $S_{11}$ , disminuye tanto a frecuencia a de 2,4 GHz hasta aproximadamente -12 dB, como de 5GHz hasta -19.96 dB. La frecuencia se desplaza un poco hasta 4,96 GHz, sin embargo, el funcionamiento de esta antena sigue siendo muy bueno.

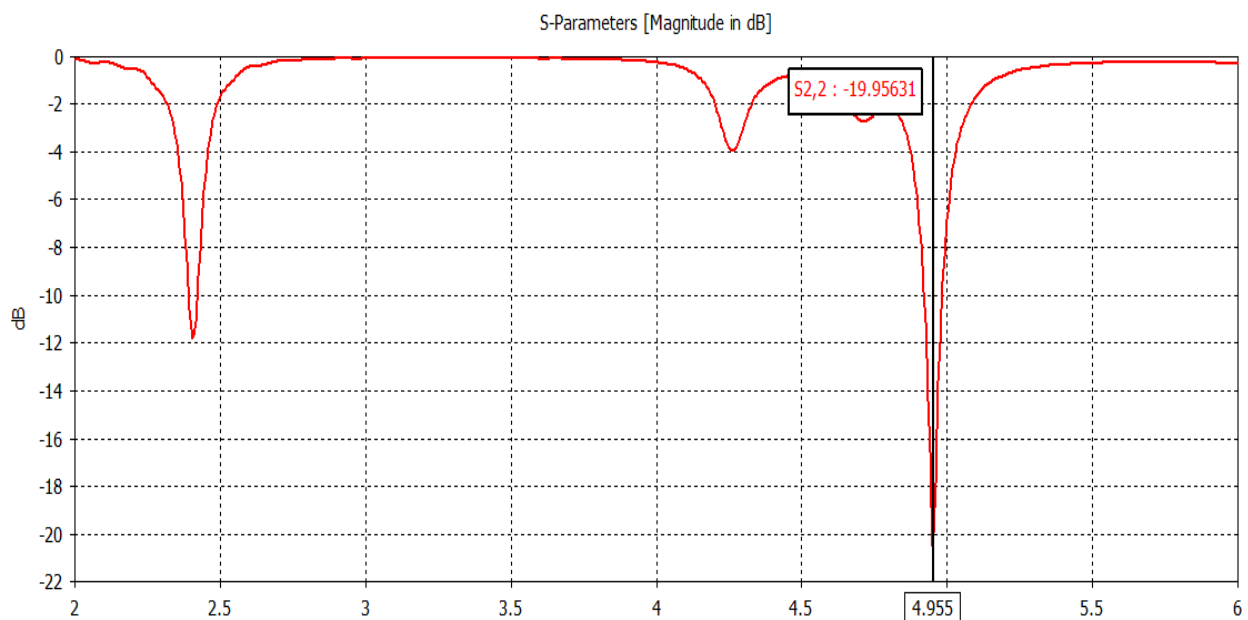


Figura 4.19 Parámetro  $S_{11}$  de la antena curva a 100 mm

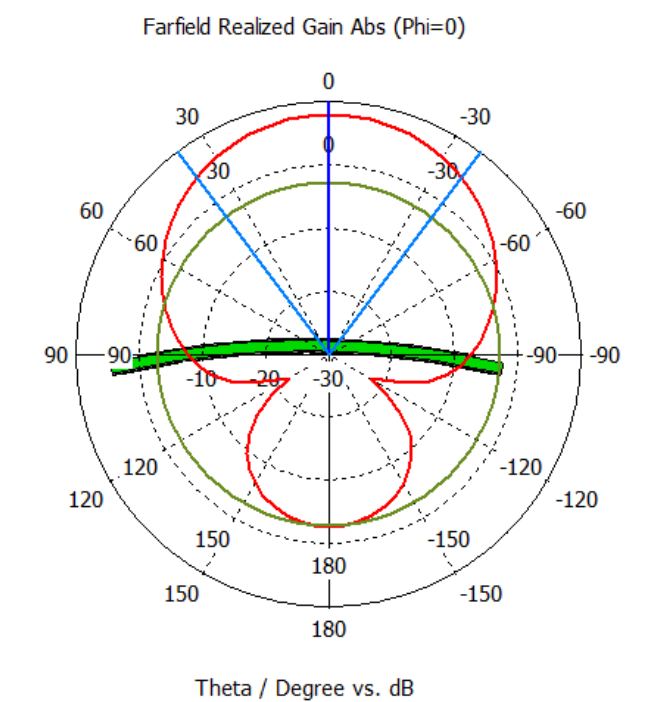


Figura 4.20 Diagrama de radiación polar de la antena curvada a 100mm a 2,4 GHz

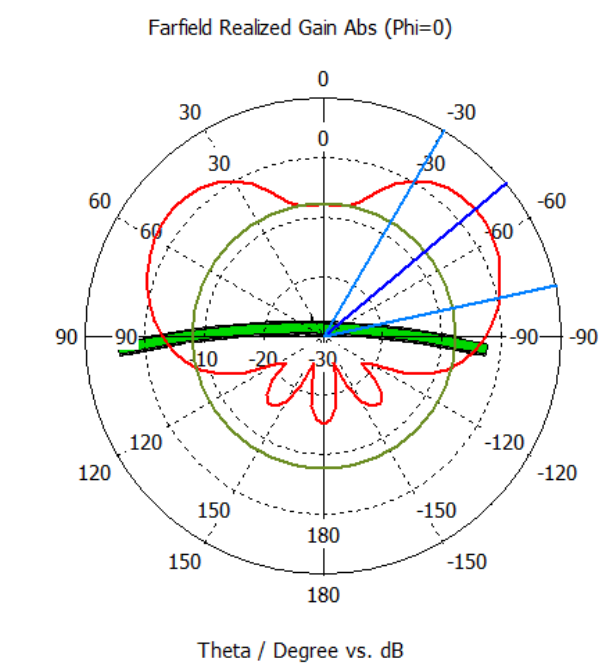


Figura 4.21 Diagrama de radiación polar de la antena curvada a 100mm a 5,0 GHz

En la *figura 4.22* se muestran los resultados de directividad obtenidos para 2,4 GHz y 5 GHz, respectivamente.

farfield (f=2.4) [2]		farfield (f=5) [2]	
Type	Farfield	Type	Farfield
Approximation	enabled (kR >> 1)	Approximation	enabled (kR >> 1)
Component	Abs	Component	Abs
Output	Directivity	Output	Directivity
Frequency	2.4 GHz	Frequency	5 GHz
Rad. effic.	-0.4059 dB	Rad. effic.	-0.2054 dB
Tot. effic.	-0.7369 dB	Tot. effic.	-1.227 dB
Dir.	8.607 dBi	Dir.	7.297 dBi

*Figura 4.22 Resultados de directividad para 2,4 GHz y 5 GHz de la antena curvada a 100 mm.*

En la *figura 4.23* se muestran los resultados de ganancia obtenidos para 2,4 GHz y 5 GHz, respectivamente.

farfield (f=2.4) [2]		farfield (f=5) [2]	
Type	Farfield	Type	Farfield
Approximation	enabled (kR >> 1)	Approximation	enabled (kR >> 1)
Component	Abs	Component	Abs
Output	Realized Gain	Output	Realized Gain
Frequency	2.4 GHz	Frequency	5 GHz
Rad. effic.	-0.4059 dB	Rad. effic.	-0.2054 dB
Tot. effic.	-0.7369 dB	Tot. effic.	-1.227 dB
rlzd.Gain	7.870 dB	rlzd.Gain	6.070 dB

*Figura 4.23 Resultados de ganancia para 2,4 GHz y 5 GHz de la antena curvada a 100 mm.*

## Radio de 85 mm

Como observa en la *figura 4.24*, el coeficiente de reflexión aumenta tanto a frecuencia a de 2,4 GHz hasta aproximadamente -9,40 dB, como de 5GHz hasta -14.81 dB. La frecuencia se desplaza un poco hasta 4,96 GHz al igual que en el radio de 100 mm. A partir de aquí el rendimiento de la antena comienza a bajar.



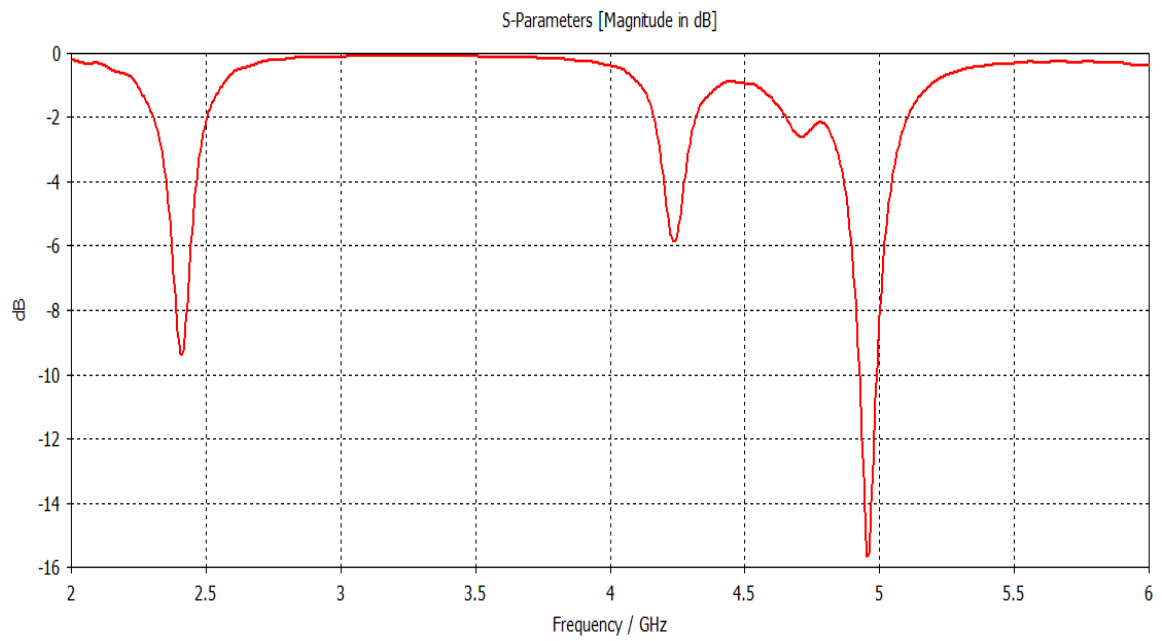


Figura 4.24 Parámetro  $S_{11}$  de la antena curvada a 85 mm

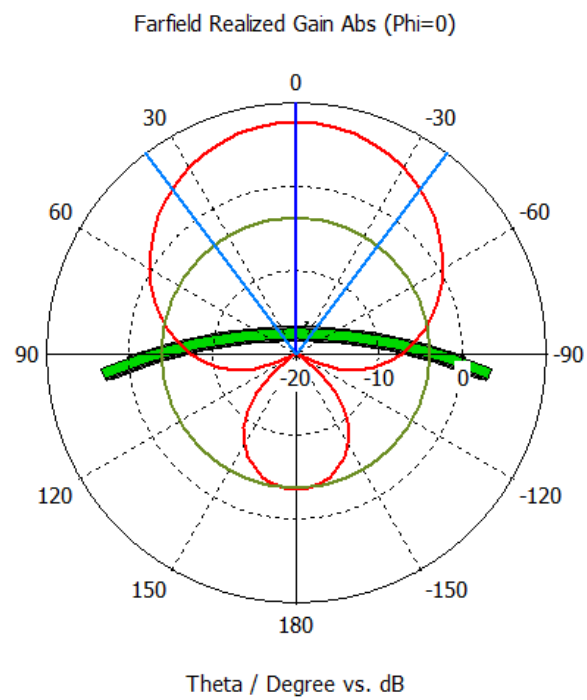


Figura 4.25 Diagrama de radiación de la antena curvada a 2,4 GHz a 85 mm.

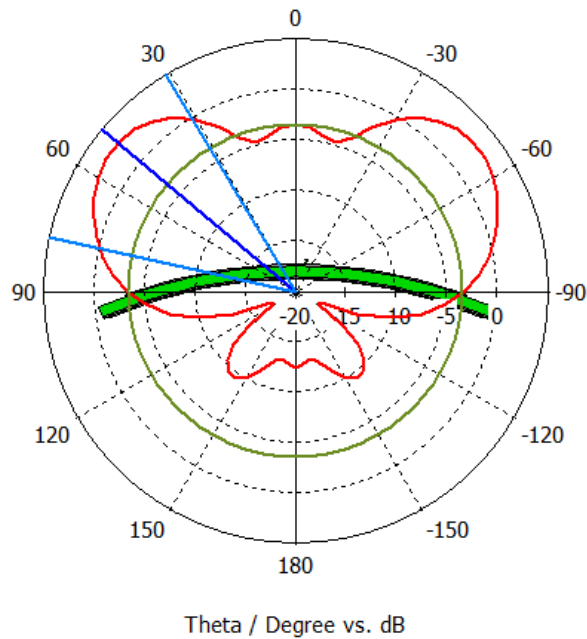


Figura 4.26 Diagrama de radiación de la antena curvada a 5 GHz a 85 mm

En la figura 4.27 se muestran los resultados de directividad obtenidos para 2,4 GHz y 5 GHz, respectivamente.

farfield (f=2.4) [2]		farfield (f=5) [2]	
Type	Farfield	Type	Farfield
Approximation	enabled (kR >> 1)	Approximation	enabled (kR >> 1)
Component	Abs	Component	Abs
Output	Directivity	Output	Directivity
Frequency	2.4 GHz	Frequency	5 GHz
Rad. effic.	-0.3321 dB	Rad. effic.	-0.2601 dB
Tot. effic.	-0.9131 dB	Tot. effic.	-0.9846 dB
Dir.	8.571 dBi	Dir.	7.101 dBi

Figura 4.27 Resultados de directividad a 2,4 Ghz y 5 Ghz curvada 85 mm

En la figura se muestran los resultados de ganancia obtenidos para 2,4 GHz y 5 GHz, respectivamente.

farfield (f=2.4) [2]		farfield (f=5) [2]	
Type	Farfield	Type	Farfield
Approximation	enabled (kR >> 1)	Approximation	enabled (kR >> 1)
Component	Abs	Component	Abs
Output	Realized Gain	Output	Realized Gain
Frequency	2.4 GHz	Frequency	5 GHz
Rad. effic.	-0.3321 dB	Rad. effic.	-0.2601 dB
Tot. effic.	-0.9131 dB	Tot. effic.	-0.9846 dB
rlzd.Gain	7.658 dB	rlzd.Gain	6.117 dB

Figura 4.28 Resultados de ganancia a 2,4 Ghz y 5 Ghz curvada 85 mm

## Radio de 75 mm

Como observa en la *figura 4.29*, el coeficiente de reflexión disminuye a frecuencia a de 2,4 GHz hasta aproximadamente -29 dB, lo cual es muy bueno, pero como a frecuencia de 5GHz aumenta hasta -5,26 dB la antenna pierde mucho rendimiento. La frecuencia se desplaza un poco hasta 4,85 GHz lo cual provocara que la antenna ya no funcione correctamente a frecuencia de 5 GHz.

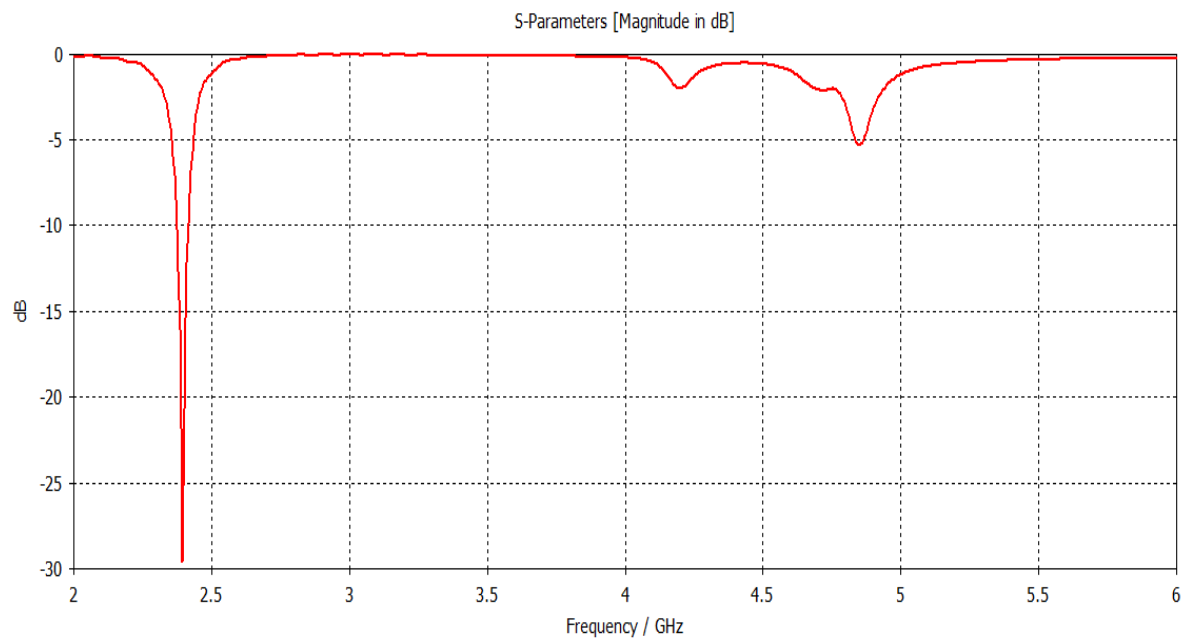


Figura 4.29 Parámetro S11 de la antenna curvada a 75 mm

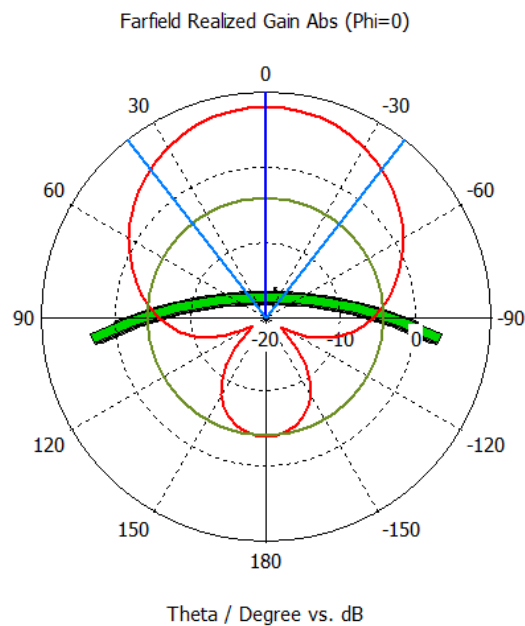


Figura 4.30 Diagrama de radiación polar a 2,4 Ghz de la antenna curvada a 75 mm

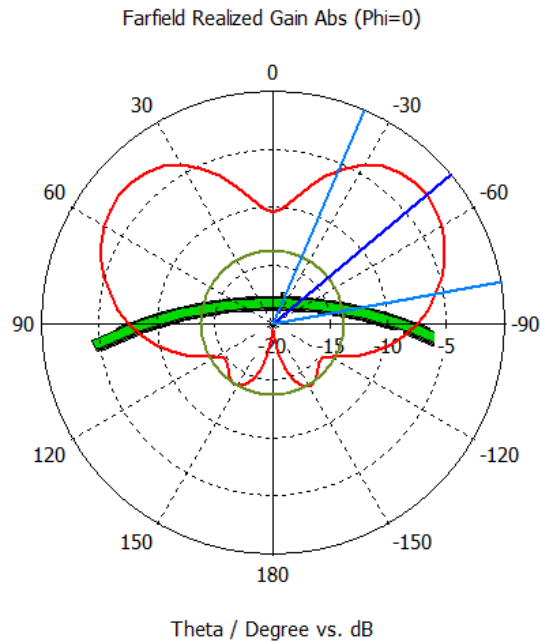


Figura 4.31 Diagrama de radiación polar a 5,0 Ghz de la antena curvada a 75 mm

En la figura se muestran los resultados de directividad obtenidos para 2,4 GHz y 5 GHz, respectivamente.

farfield (f=2.4) [2]		farfield (f=5) [2]	
Type	Farfield	Type	Farfield
Approximation	enabled (kR >> 1)	Approximation	enabled (kR >> 1)
Component	Abs	Component	Abs
Output	Directivity	Output	Directivity
Frequency	2.4 GHz	Frequency	5 GHz
Rad. effic.	-0.3970 dB	Rad. effic.	-0.1071 dB
Tot. effic.	-0.4343 dB	Tot. effic.	-6.296 dB
Dir.	8.483 dBi	Dir.	6.621 dB

Figura 4.32 Resultados de directividad para 2,4 Ghzz y 5,0 Ghz de la antena curvada a 75 mm

En la figura se muestran los resultados de ganancia obtenidos para 2,4 GHz y 5 GHz, respectivamente.

farfield (f=2.4) [2]		farfield (f=5) [2]	
Type	Farfield	Type	Farfield
Approximation	enabled (kR >> 1)	Approximation	enabled (kR >> 1)
Component	Abs	Component	Abs
Output	Realized Gain	Output	Realized Gain
Frequency	2.4 GHz	Frequency	5 GHz
Rad. effic.	-0.3970 dB	Rad. effic.	-0.1071 dB
Tot. effic.	-0.4343 dB	Tot. effic.	-6.296 dB
rlzd.Gain	8.049 dB	rlzd.Gain	0.3246 dB

Figura 4.33 Resultados de ganancia para 2,4 Ghzz y 5,0 Ghz de la antena curvada a 75 mm

#### 4.1.5 Resumen de resultados

Para terminar con la parte de simulación de la antena operando en vacío, se retomaron todos los resultados de la simulación y se presentan a continuación.

Frecuencia (GHz)	Parámetro S11 (dB)	Directividad (dBi)	Ganancia (dB)	Eficiencia
2,4	-10,61	8,61	7,67	89,08%
5	-13,87	7,5	7,04	93,87%

*Tabla 4-3 Resultados finales de los parámetros de la antena plana.*

Frecuencia (GHz)	Parámetro S11 (dB)	Directividad (dBi)	Ganancia (dB)	Eficiencia
2,4	-12	8,61	7,87	91,41%
5	-19,96	7,3	6,07	83,15%

*Tabla 4-4 Resultados finales de los parámetros de la antena doblada a 100 mm.*

Frecuencia (GHz)	Parámetro S11 (dB)	Directividad (dBi)	Ganancia (dB)	Eficiencia
2,4	-9,40	8,57	7,66	89,38%
5	-14,81	7,10	6,12	86,20%

*Tabla 4-5 Resultados finales de los parámetros de la antena dobla a 85 mm.*

Frecuencia (GHz)	Parámetro S11 (dB)	Directividad (dBi)	Ganancia (dB)	Eficiencia
2,4	-29,00	8,48	8,05	94,90%
5	-5,26	6,62	0,33	4,99%

*Tabla 4-6 Resultados finales de los parámetros de la antena doblada a 75 mm*

FRECUENCIA/ RADIO DE CURVATURA	75 MM	85 MM	100 MM
<b>2,4 GHZ</b>	+ 5,10%	+ 0,3%	+2,33%
<b>5 GHZ</b>	-88,88%	- 7,67%	-10,72%

*Tabla 4-7 Diferencias de eficiencias al compararlas con la antena plana.*

Como se observa en *la tabla 4-7*, al doblarse más la antena (Entre menor el diámetro, mayor esta doblada la antena) la eficiencia de la antena operando a 2,4 GHz parece aumentar respecto a cuando esta plana. Sin embargo, en el otro caso de 5 GHz, prácticamente la antena deja de funcionar a esta frecuencia ya que su eficiencia disminuye muchísimo entre más se curve la antena.

#### 4.2 Relación de absorción específico (SAR)

Ahora que se sabe que el modelo opera según los parámetros propuestos según los resultados de la simulación, se continua con el segundo paso que es realizar las simulaciones del modelo en las partes del cuerpo para frecuencias de 2,4 GHz y 5 GHz respectivamente.

El CST Studio Suite 2018 contiene una librería con varios cuerpos con los cuales se pueden simular junto con la antena para observar como interactúan entre sí. Es decir, para poder saber que tanto cambian los parámetros de la antena al operar cerca del cuerpo y los niveles de radiación que el cuerpo absorbe debido al campo electromagnético generado por la antena. Estos cuerpos incluyen incluso venas, músculos, sangre, entre otros.

Para este proyecto se descargó un modelo humano cuyas características físicas se presentan en la *figura 4.34*.

```
// References:
// "www.fcc.gov/fcc-bin/dielec.sh - 09/2002"
// "Thermal conductivity data for specific tissues and organs for humans and other mammalian species." - Professor Kenneth R. Holmes
//
// For the thermal conductivity of Marrow, Eye, NeuronalFabric, Lens, NervusOpticus, Cartilages, MucousMembrane, Lung, Intestine,
// Glands, Stomach, Pancreas, Bladder, GallBladder and IntestineContents the value of pure water (0.624 W/mK) is used.
//
// "Heat capacity, blood flow, and basal metabolic rate are from:
//
// Tissue          Num      Eps          Mue          Kappa          Rho          K          HeatCap          BloodFlow          MetabolicRate
// [s/m]          [kg/m^3]      [W/mK]      [kJ/K/kg]      [W/K/m^3]
//
Marrow            1         6.487770      1.0          0.022727      1030         0.624         2.7              32000             5700
FatTissue         2         6.073879      1.0          0.036292      1100         0.201         2.5              1700             300
Bones             3         15.282458     1.0          0.064312      1850         0.410         1.3              3400             610
WhiteSubstance    4         56.801750     1.0          0.324048      1030         0.502         3.6              17280            7100
GraySubstance     5         80.133881     1.0          0.559412      1030         0.502         3.7              40000            7100
Skin              6         72.930298     1.0          0.491243      1100         0.293         3.5              9100             1620
Eye               7         67.882843     1.0          0.904454      1010         0.624         4.178            10300            14250
SkeletonMuscle    8         66.405327     1.0          0.753617      1040         0.460         3.6              2700             480
Blood             9         76.821907     1.0          1.233151      1000         0.505         3.9              0                0
NeuronalFabric    11        89.758575     1.0          0.790235      1030         0.624         3.5              40000            7100
Lens              12        55.099537     1.0          0.600257      1050         0.624         3.0              0                0
NervusOpticus     13        47.264732     1.0          0.338128      1030         0.624         3.5              40000            7100
Cartilages        14        55.755905     1.0          0.474566      1030         0.624         3.5              9000             1600
MucousMembrane    15        65.969017     1.0          0.523208      1100         0.624         3.3              9000             1600
Air               16        1.000000      1.0          0.000000      1.3          0.025         1.005            0                0
Lung              17        31.638607     1.0          0.305671      1020         0.624         3.6              9500             1700
Intestine         18        81.793549     1.0          0.679973      1020         0.624         3.7              53000            9500
Kidney            19        98.098824     1.0          0.810724      1020         0.499         3.9              270000           48000
Liver             20        69.021736     1.0          0.487209      1020         0.469         3.6              68000            12000
Glands            22        68.802452     1.0          0.794234      1020         0.624         3.6              360000           64000
Spleen            23        90.658592     1.0          0.801586      1020         0.543         3.7              82000            15000
Stomach           24        77.898315     1.0          0.899684      1020         0.624         3.6              29000            5200
Pancreas          25        77.898315     1.0          0.899684      1020         0.624         3.5              41000            7300
Bladder           26        22.651829     1.0          0.293920      1010         0.624         3.3              9000             1600
GallBladder       27        78.996292     1.0          1.013696      1020         0.624         3.9              0                0
IntestineContents 28        96.537590     1.0          1.655177      1020         0.624         4.2              0                0
VentriclesRight   30        90.817200     1.0          0.733013      1000         0.493         4.2              0                0
VentriclesLeft    31        90.817200     1.0          0.733013      1000         0.493         4.2              0                0
ForecourtRight    32        90.817200     1.0          0.733013      1000         0.493         3.7              54000            9600
ForecourtLeft     33        90.817200     1.0          0.733013      1000         0.493         3.7              54000            9600
BloodV            43        76.821907     1.0          1.233151      1000         0.493         3.9              0                0
BloodA            44        76.821907     1.0          1.233151      1000         0.493         3.9              0                0
```

Figura 4.34 Características físicas del modelo humano.

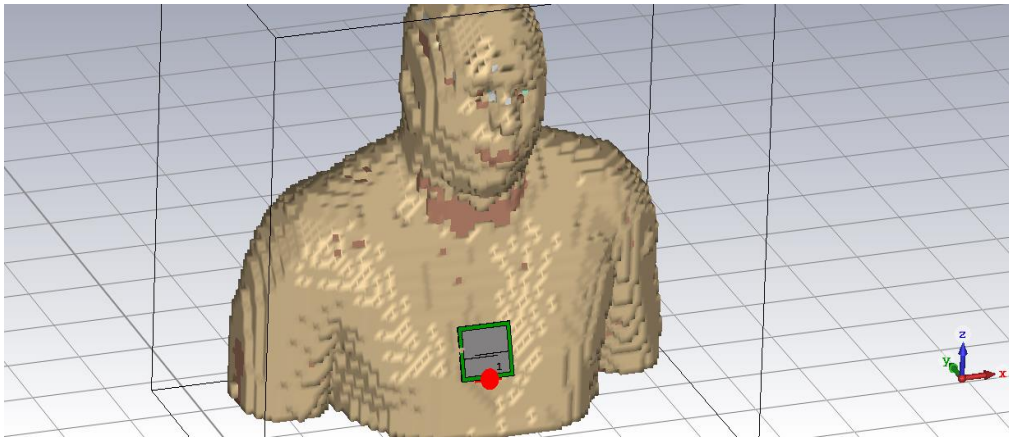
Todas las simulaciones SAR que se presentan a continuación se han trabajado a **0,5 W** a un peso promedio de **10g**.

#### 4.2.1 Simulación SAR para 2,4 GHz

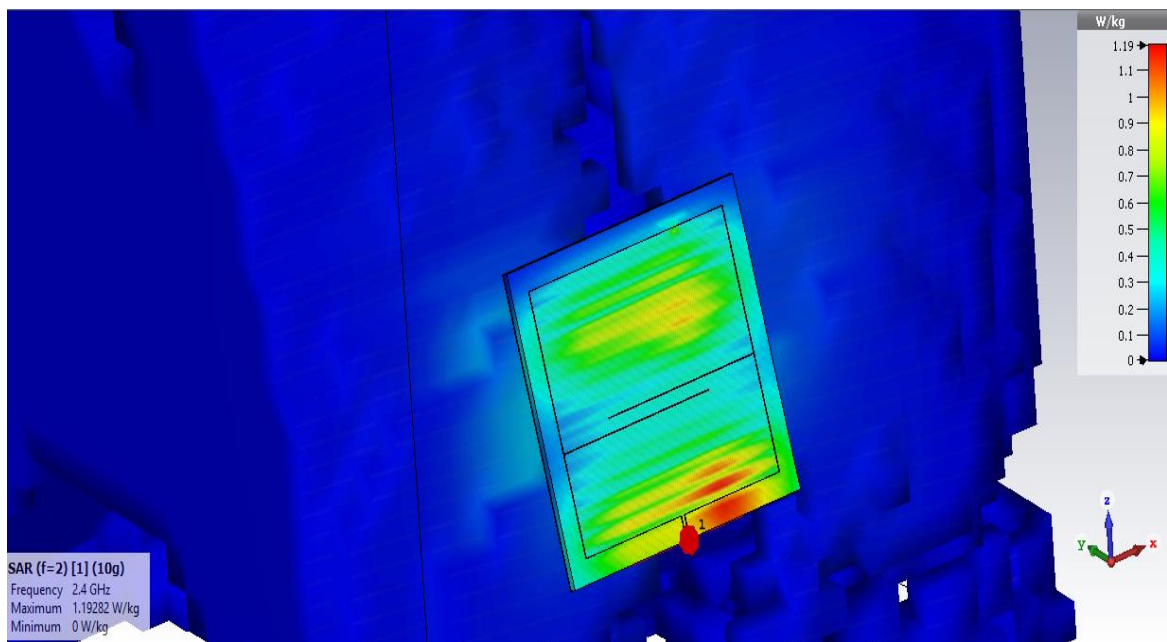
A continuación, se presentan las simulaciones realizadas para frecuencia de 2,4 GHz en el pecho, brazo y espalda del cuerpo.

##### 4.2.1.1 Simulación en el pecho.

Para esta simulación, la antena se montó con ángulo de 70 grados respecto al eje X para poder mantener de cierta manera paralela la antena con el cuerpo como se muestra en la figura 4.35 y 4.36.



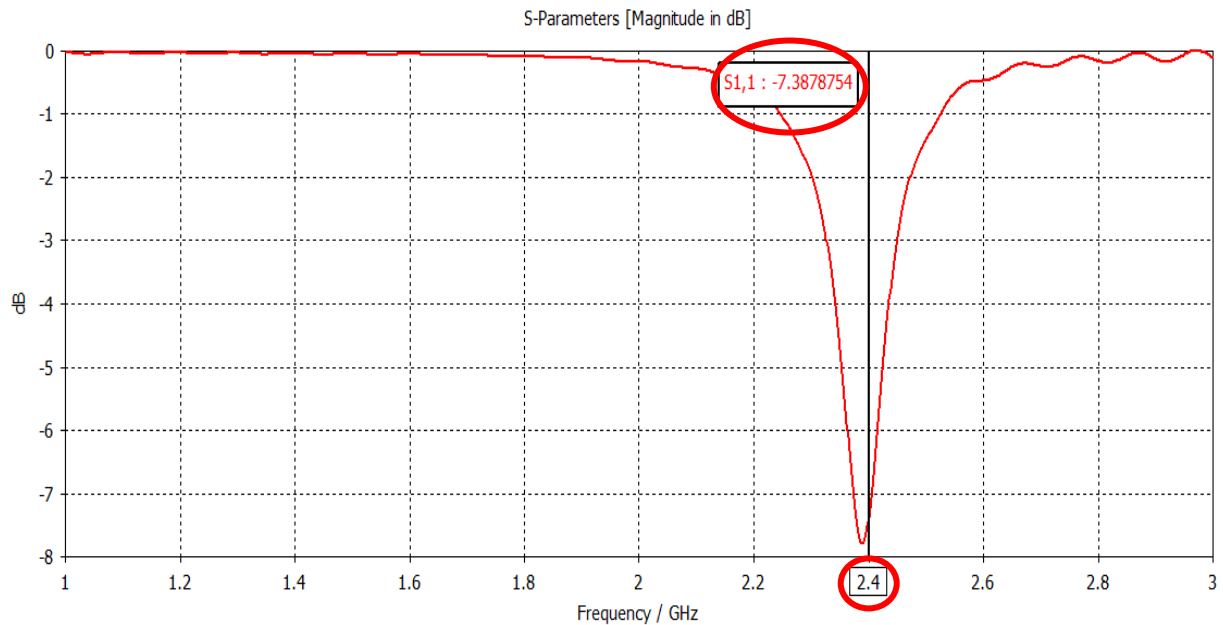
*Figura 4.35 Antena colocada en el pecho*



*Figura 4.36 Simulación SAR 10g a 2,4 GHz: Pecho*



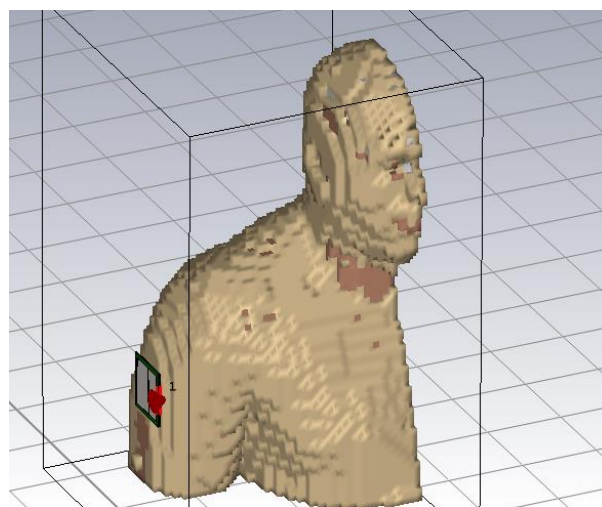
Como se muestra en la *figura 4.37*, al simular la antena cerca del cuerpo, la gráfica del parámetro S11 de la antena cambia un poco en este caso respecto a cuando se simuló en el espacio libre. Sin embargo, trabajando a 2,4 GHz la antena prácticamente no modifica su frecuencia y su parámetro S-11 disminuye a -7.39 dB, lo cual sigue estando muy bien.



*Figura 4.37 Parámetro S11 de la antena 2,4Ghz en el pecho*

#### 4.2.1.2 Simulación en el brazo.

En esta simulación se montó la antena con ángulo apropiadamente de 180 grados para poder mantener de cierta manera paralela la antena con el cuerpo. (*Figura 4.38 y 4.39*)



*Figura 4.38 Antena montada en el brazo derecho.*

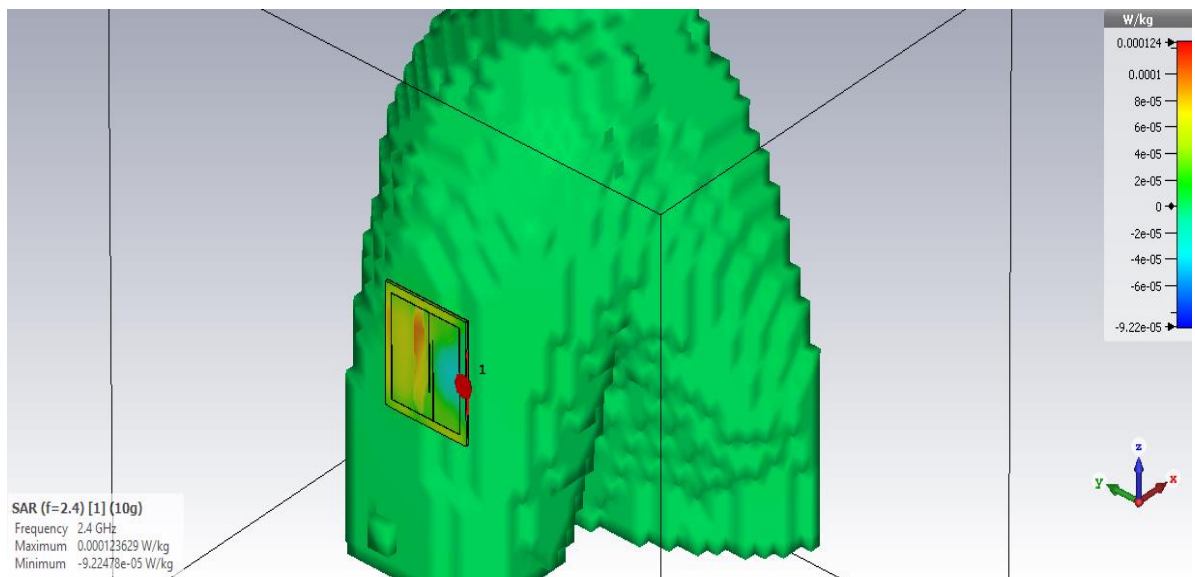


Figura 4.39 Simulación SAR 10g a 2,4 GHz: Brazo

Como se muestra en la figura 4.40, al igual que el caso de la antena simulada sobre el pecho, al simular la antena en el brazo, la gráfica del parámetro S11 de la antena cambia un poco en este caso respecto a cuando se simuló en espacio libre.

Simulando a 2,4 GHz la antena en el brazo, sí que se modifica notablemente la gráfica del parámetro S11 de la antena, desplazándose frecuencia hasta 2,96 GHz aproximadamente y su parámetro S-11, al contrario que en el caso anterior, aumenta un poco a -10,94 dB.

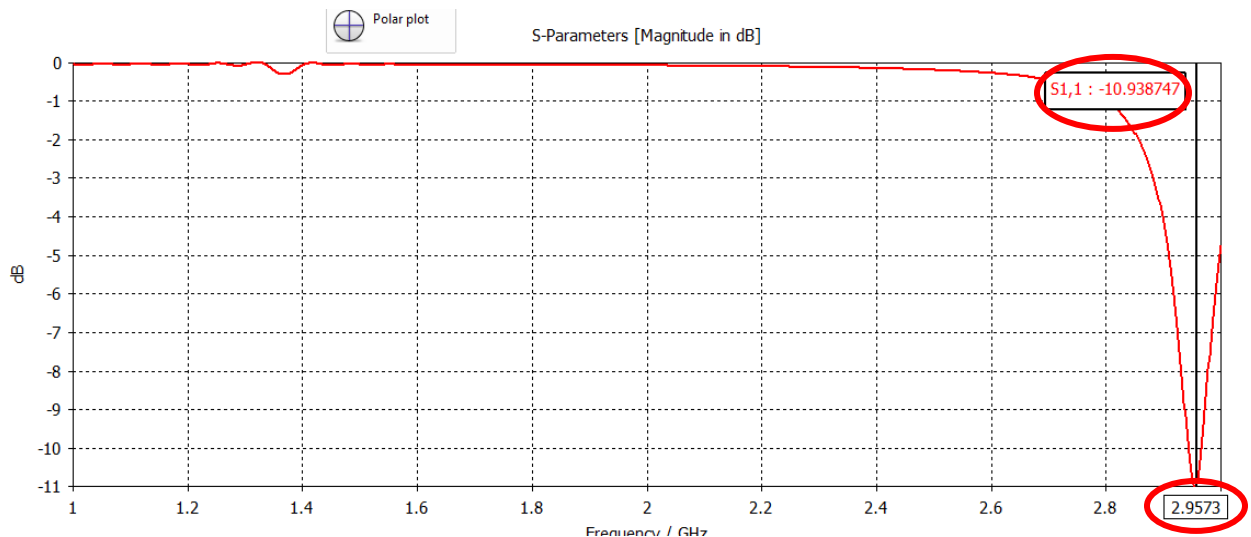


Figura 4.40 Parámetro S11 de la antena a 2,4 GHz en el brazo

#### 4.2.1.3 Simulación en la espalda

En esta simulación se montó la antena con ángulo apropiadamente de 180 grados para poder mantener de cierta manera paralela la antena con el cuerpo. (Figura 4.41 y 4.42)

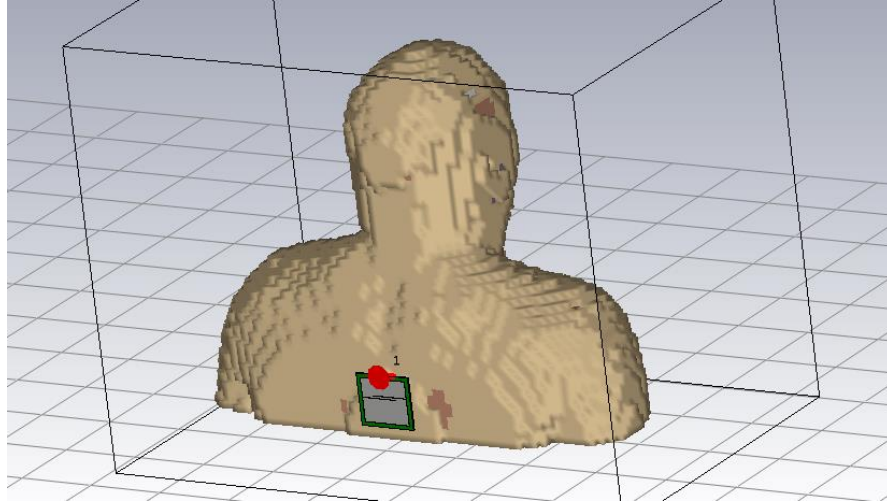


Figura 4.41 Antena montada en la espalda

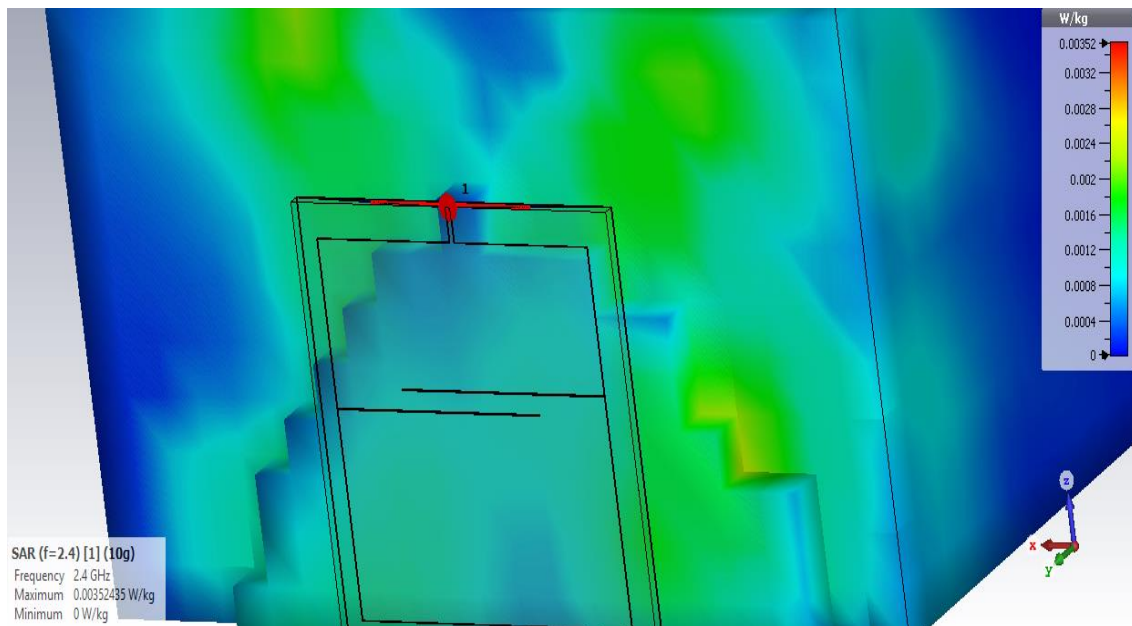


Figura 4.42 Simulación SAR 10g a 2,4 GHz: Espalda

Como se muestra en la figura 4.43, simulando a 2,4 GHz la antena en la espalda se modifica notablemente la gráfica del parámetro S11 de la antena, desplazándose frecuencia hasta 3GHz y disminuyendo su parámetro S11 hasta -7,38 dB.

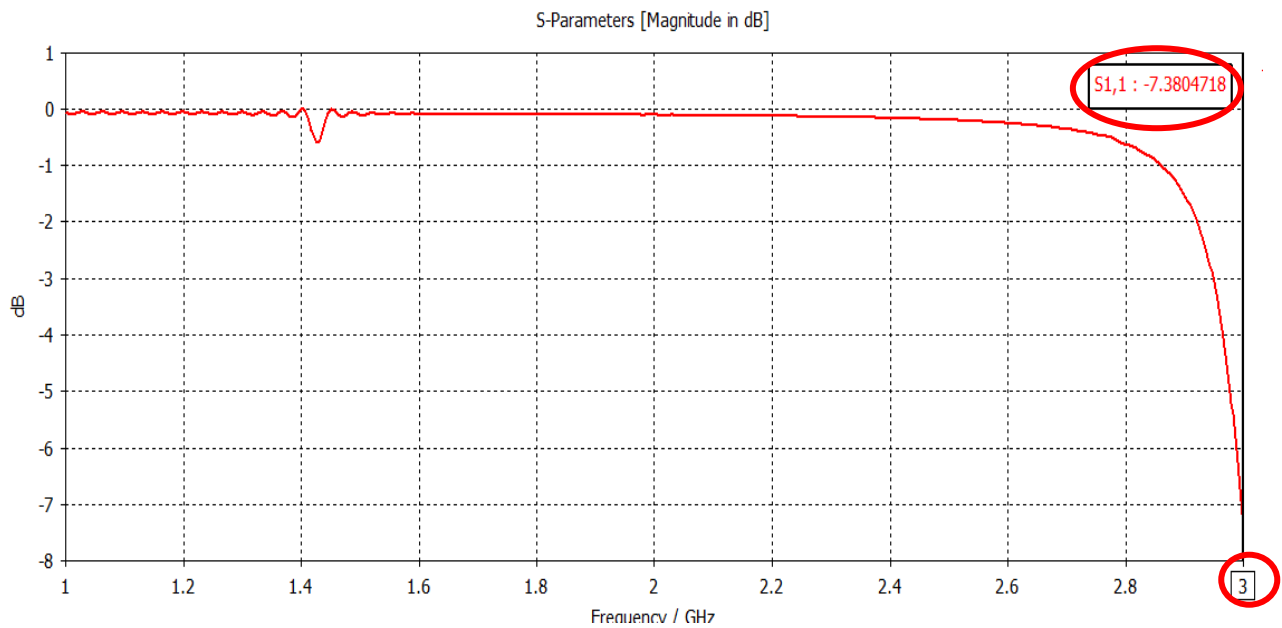


Figura 4.43 Parámetro S11 de la antena trabajando a 2,4 GHz en la espalda.

#### 4.2.2 SAR para 5 GHz

A continuación, se presentan las simulaciones realizadas para frecuencia de 5 GHz en el pecho, brazo y espalda del cuerpo.

##### 4.2.2.1 Simulación en el pecho.

Al igual que para la simulación de la antena en el pecho a 2,4 GHz, se montó la antena con ángulo apropiadamente de 70 grados respecto al eje X para poder mantener de cierta manera paralela la antena con el cuerpo. (Figura 4.44)

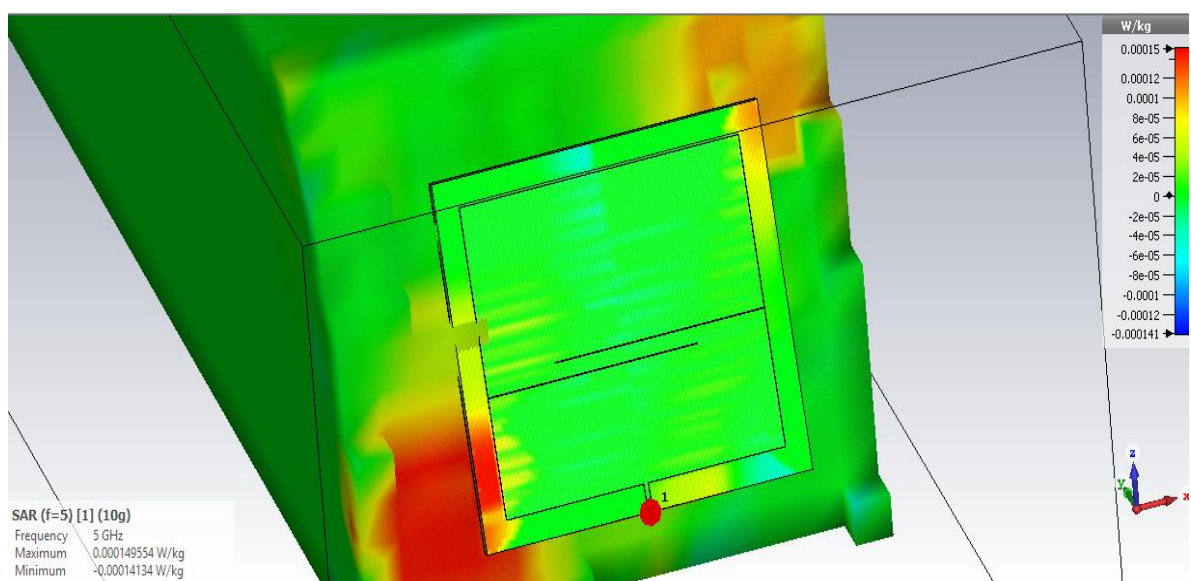
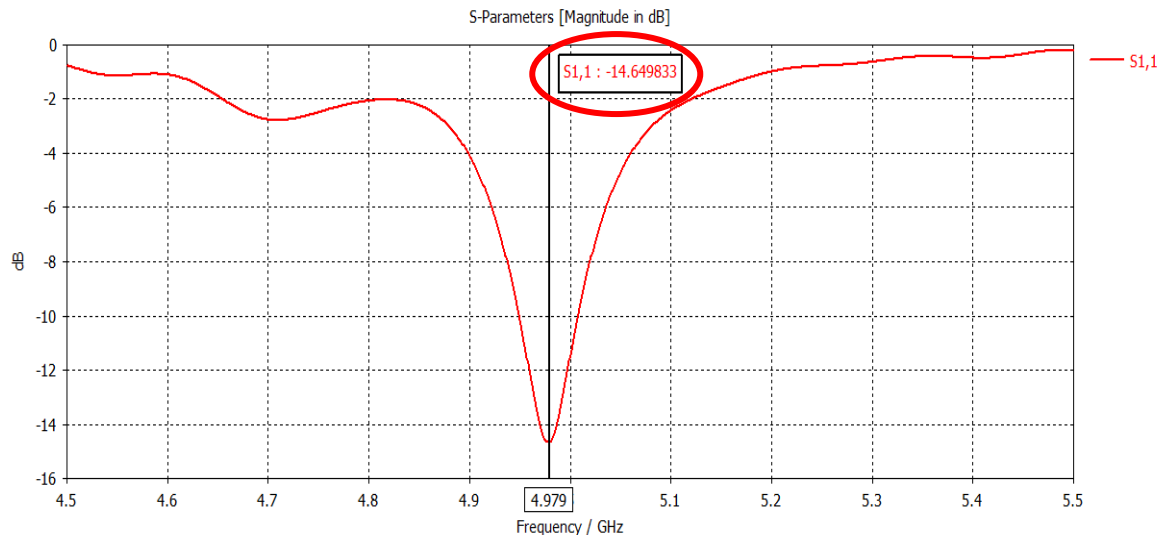


Figura 4.44 Simulación SAR 10g a 5Ghz: Pecho

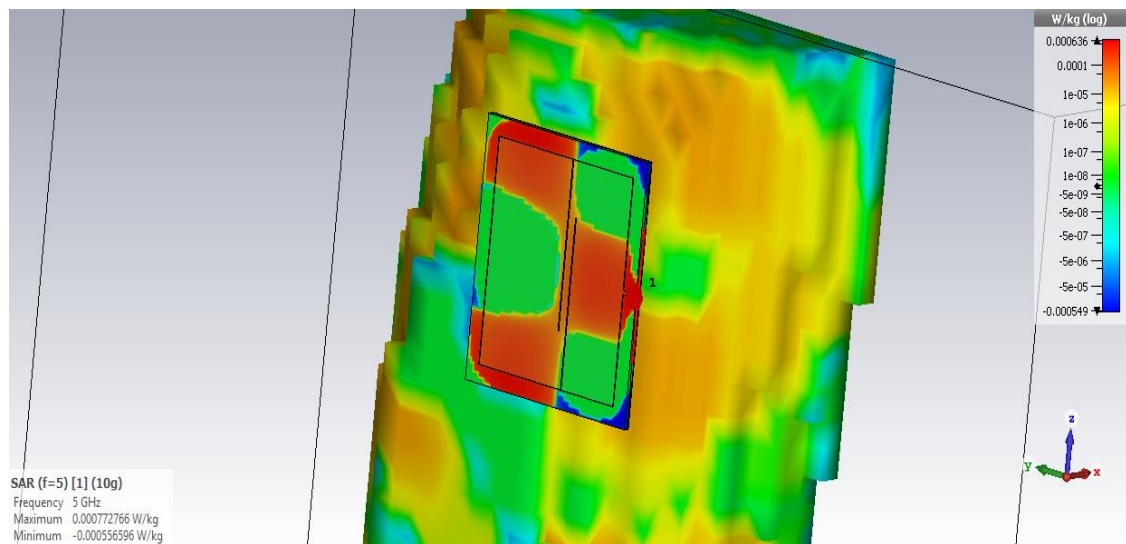
Al simular la antena cerca del cuerpo a la potencia de 0,5 W para 5 GHz, como se muestra en la *figura 4.45*, la gráfica del parámetro S-11 de la antena cambia, aunque esta vez de manera más leve que a 2,4 GHz. La frecuencia se desplaza a 4.98 GHz aproximadamente y su parámetro S-11 aumenta a -14,65 dB.



*Figura 4.45 Parámetro S11 de la antena operando a 5 GHz en el pecho*

#### 4.2.2.2 Simulación en el brazo.

En esta simulación se montó la antena con ángulo apropiadamente de 180 grados para poder mantener de cierta manera paralela la antena con el cuerpo. (*Figura 4.46*)



*Figura 4.46 Simulación SAR 10g a 5 GHz: Brazo*

Para la simulación SAR en el brazo para 5 GHz, como se muestra en la figura 4.47, la gráfica del parámetro S-11 prácticamente no cambia. La frecuencia se desplaza a 4.992 GHz y su parámetro S-11 aumenta a -14,83 dB.

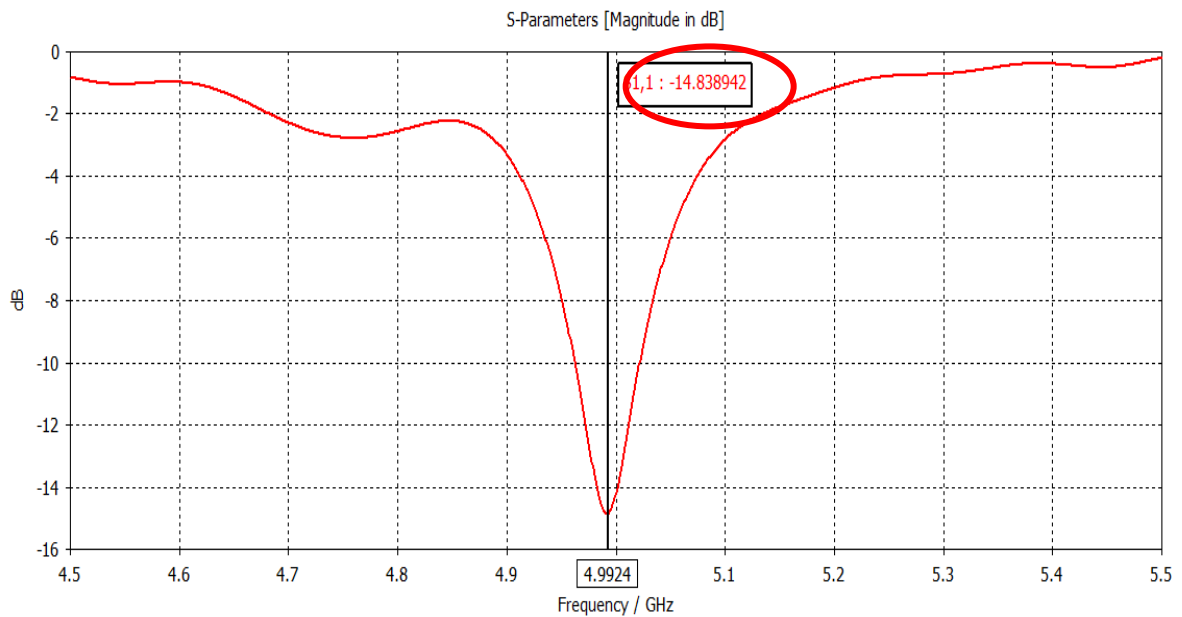


Figura 4.47 Parámetro S11 de la antena operando a 5 GHz en el brazo

#### 4.2.2.3 Simulación en la espalda.

En esta simulación se montó la antena con ángulo apropiadamente de 180 grados para poder mantener de cierta manera paralela la antena con el cuerpo. (Figura 4.48)

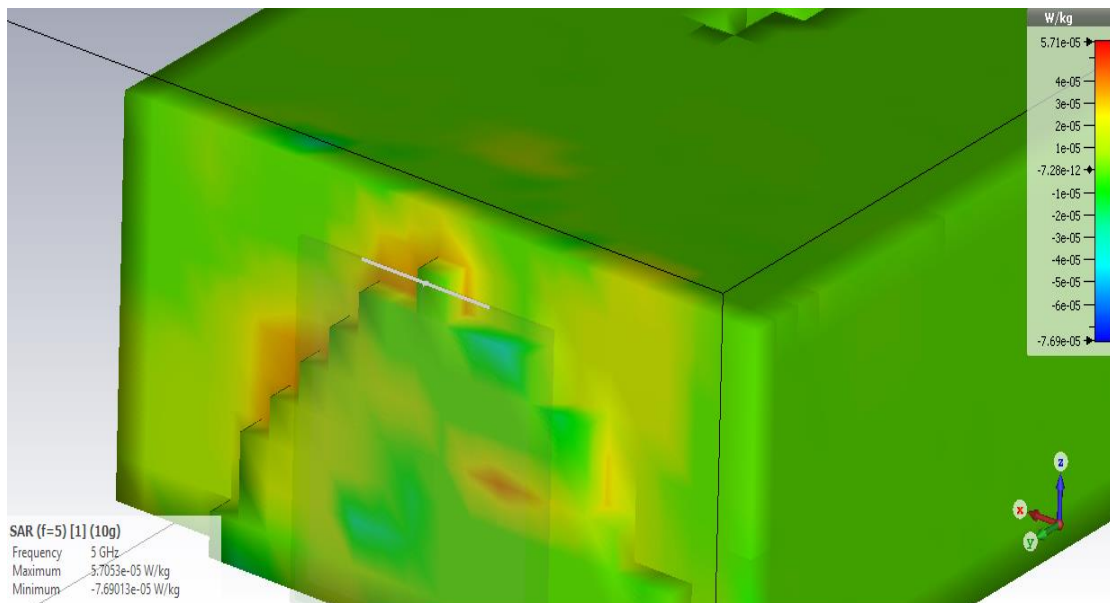


Figura 4.48 Simulación SAR 10g a 5GHz en la espalda



Y para la última simulación en 5 GHz, la gráfica del parámetro S11 prácticamente no cambia. La frecuencia se desplaza levemente a 4.9895 GHz y su parámetro S11 aumenta a -15,19 dB. (Figura 4.49)

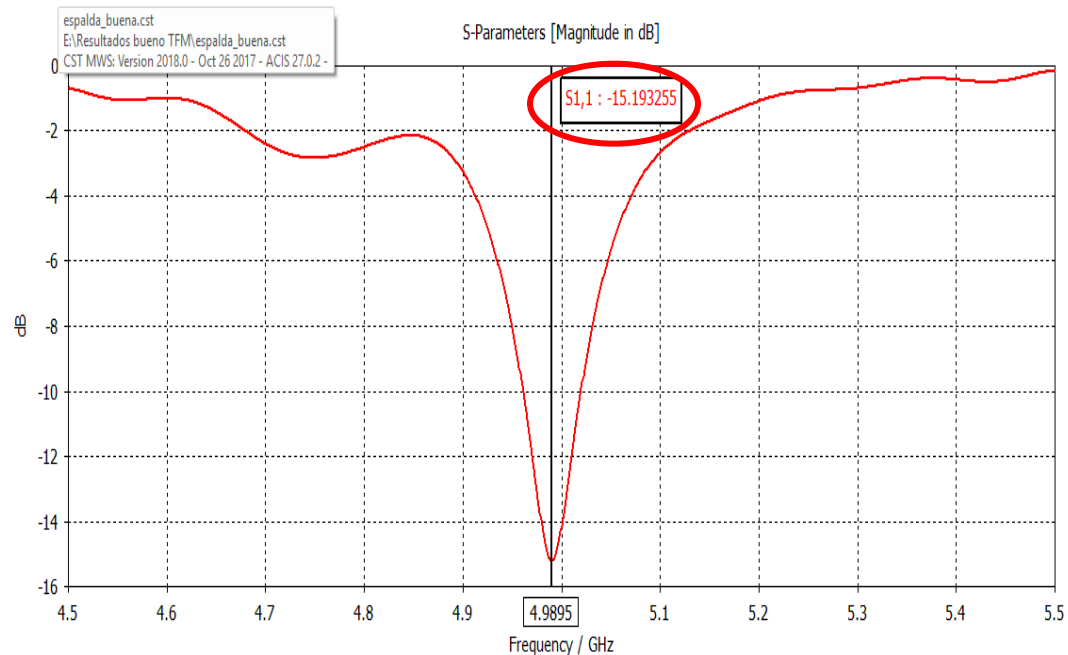


Figura 4.49 Parámetro S11 de la antena operando a 5GHz en la espalda.

#### 4.2.3 Resumen de resultados SAR

En el capítulo 3, se presentaron las normativas IEEE para SAR permitidos en Europa. De acuerdo con estos estándares, al compararlos con la *tabla 4-4*, la antena cumple con ellos perfectamente. El único que se acerca considerablemente al valor estándar la antena a frecuencia de 2,4 GHz cuando está en el pecho.

Sin embargo, esto representa el 59,65% del valor estándar (2 W/Kg para 10g [2]) por lo tanto, se puede concluir que esta antena cumple perfectamente con la normativa IEEE para SAR en cualquiera de estas 3 partes del cuerpo.

FREC. / SAR	PECHO (W/Kg)	BRAZO (W/Kg)	ESPALDA (W/Kg)
2,4 GHz	1,193	1,24 x 10 <sup>-4</sup>	3,524 x 10 <sup>-3</sup>
5,0 GHz	1,495 x 10 <sup>-4</sup>	7,728 x 10 <sup>-4</sup>	5,71 x 10 <sup>-6</sup>

Tabla 4-8 Resultados de simulación SAR a 10g

## 5. Conclusiones y trabajo a futuro

En este capítulo se presentan las conclusiones de este estudio y propuestas como trabajos a futuros.

### 5.1 Conclusiones

El objetivo principal de este proyecto fue diseñar y modelar una antena sobre sustrato textil que trabajara para frecuencias de 2,4 GHz Y 5GHz y cumpliendo con la normativa IEEE para los valores de SAR permitidos. Se puede decir que se obtuvo una antena que cumple con todos estos parámetros satisfactoriamente. Se puede decir también que la antena puede perfectamente integrarse en una camisa, por ejemplo, sin que esta que pierda su estética o afecte lo movimientos de alguna manera al usuario ya que las medidas que posee la hacen muy versátil para este tipo de prendas.

Se probó también que la antena, con la ayuda del software CST Studio Suite 2018, tiene trabajo diferentes cuando se doble. Entre más se curva la antena, menos eficiente será para operar a 5 GHz hasta el punto de que prácticamente no funcione a esa frecuencia.

Las modificaciones se centraron en el parche. Se realizaron cientos de simulaciones hasta conseguir las frecuencias de operación propuestas con la antena plana.

Al mismo con el CST Studio Suite 2018 se realizaron las pruebas del SAR en 3 partes del cuerpo modelo que fueron el pecho, la espalda y el brazo derecho, para comprobar que la antena es apta para el uso cerca del cuerpo humano, y se concluye que los resultados estas simulaciones son positivas.

### 5.2 Trabajo a futuro

Ya que el tema de textiles inteligentes y la electrónica usable tiene un gran potencial que explotar, con este trabajo aparecen varias ramas alternativas de mejora abiertas para futuros proyectos para continuar con el.

La primera propuesta es conseguir lograr que la antena trabaje a más de 2 frecuencias. Esto se puede lograr modificando las medidas del parche y la altura del sustrato. Cabe mencionar que esto requiere de tiempo puesto que cuando se consigue que la antena trabaje para frecuencia al mismo tiempo se modifican las demás, sin embargo, es una buena propuesta para futuros trabajos.

Otra propuesta es llevarla a la realidad y probarla con materiales que cumplan con los requisitos de flexibilidad, versatilidad y estética. Por cuestión de costos, se propone probarlo con los materiales que dispongan en el laboratorio. Para el caso de los materiales conductivos puede probarse con cobre.

Como última propuesta muy personal, sería interesante dedicar una investigación profunda a todas las posibles aplicaciones que pueden existir entorno a las antenas para textiles inteligentes tanto en el ámbito industrial como también la vida cotidiana.



## Bibliografía

- [1] “IEEE Standard for Information technology”. IEEE 802.15.1-2005.
- [2] "IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas". IEEE Std 145-1993: 1–32. 1993-07-01, 1993.
- [3] <https://www.idc.com/getdoc>
- [4] <https://www.eleconomista.es>
- [5] <https://www.inti.gob.ar>
- [6] “Intelligent textiles and Clothing” by H.R Mattila,2006.
- [7] <https://www.aitex.est>
- [8] <https://www.autodesk.com>
- [9] “Diseño y Medición de una Antena Wearable” por Mohamed El Bouchti, 2017
- [10] <https://sites.google.com/site/3cuelectronica/home/radio-enlaces-1/antenas>
- [11] [https:// www.cst.com](https://www.cst.com)
- [12] T. Wittig «SAR Overview,» de UGM, 2007.
- [13] <https://www.Pasternack.com>
- [14] “Tutorial CST Studio Suite 2018”
- [15] “GPS antenna for Smart Textiles” por Damián Tarabasz, 2017
- [16] “Antenna Theory: Analysis and Design” by Constantine A. Balanis, 2005.